



HAL
open science

Agroécologie et numérique - quels outils pour comprendre et concevoir des systèmes agricoles plus durables ?

Marie Gosme

► To cite this version:

Marie Gosme. Agroécologie et numérique - quels outils pour comprendre et concevoir des systèmes agricoles plus durables ?. Agronomie. Montpellier, 2021. tel-03236996

HAL Id: tel-03236996

<https://hal.inrae.fr/tel-03236996>

Submitted on 26 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DOSSIER DE CANDIDATURE EN VUE D'OBTENIR :

HABILITATION à DIRIGER LES RECHERCHES

Université de Montpellier

Ecologie fonctionnelle et Sciences Agronomiques



AGROECOLOGIE ET NUMERIQUE - QUELS OUTILS POUR COMPRENDRE ET
CONCEVOIR DES SYSTEMES AGRICOLES PLUS DURABLES ?

Présenté par :

Marie Gosme, Chargée de Recherches, INRAE

Devant le jury composé de :

Mme Véronique Bellon-Maurel, DR, INRAE..... Examinatrice

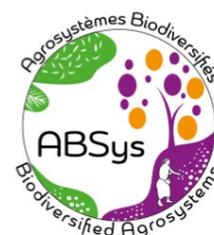
Mme Marie-Hélène Jeuffroy, DR, INRAE..... Rapporteuse

M. William Puech, PR, Université de Montpellier..... Examineur

M. Olivier Thérond, IR-HDR, INRAE..... Rapporteur

M. Daniel Wipf, PR, Université de Bourgogne..... Rapporteur

Soutenance publique le 5/5/2021



A Clémence, Agathe, Juliette, Amandine, Martin, Paul, Adèle, Alice, Gaspard, Sacha,
Joseph, Eliette, Clément, Gabin, Pauline, Elise, Simon, Flore, Baptiste, Thomas,
Camille, Gaspard bis, Achille, Charline, Mateo, Naomi, Arthur, Lucie,
Arthur bis, Gabrielle, Martin bis, Emilie, Maylis, Raphael, Lisa
Marianne, Lucile, Elsa, Zoé, Adèle bis, Agathe bis
et tous les enfants du monde.
Puissent-ils vivre dans un monde plus sain et plus équitable

Remerciements

Qui l'eût cru ? Après des années de procrastination, j'ai finalement rédigé mon HDR ! Merci Bruno Rapidel et Pierre-Eric Lauri pour la "saine et impérative stimulation" pour passer cette HDR ; j'ai eu un peu peur le jour où vous êtes entrés dans mon bureau, avez fermé la porte et avez commencé à dire "Marie, on voudrait te parler..." mais finalement, ça valait le coup ! Et merci pour vos conseils lors de cette rédaction. Je remercie également Delphine Mézière et Christian Dupraz pour leurs retours sur un premier jet, et pour leur soutien en général. Je dois aussi beaucoup au Christian d'il y a 25 ans car il a cru en l'agroforesterie envers et contre tous, il a créé l'expérimentation agroforestière de Restinclières et l'a animée sans relâche et sans faillir malgré les difficultés techniques et administratives, les réticences de certains, le vent, la pluie, la covid, etc. C'est un visionnaire et un fonceur, parfois pas facile à suivre, mais dont l'énergie rejaillit sur ses collaborateurs. Sans lui, l'agroforesterie en France (et peut-être aussi dans le monde) ne serait pas ce qu'elle est. Mais Restinclières, c'est aussi Lydie Dufour, mémoire vivante des expérimentations depuis 18 ans et dépositaire de quelques dizaines de milliers de données patiemment accumulées par des armées de stagiaires et de doctorants depuis l'époque héroïque où Excel n'existait pas (bon courage pour intégrer les fichiers Lotus 1.2.3 et Quattro pro dans la base de données !).

Ma gratitude va également aux techniciens, cheville ouvrière et indispensable de la recherche, avec qui j'ai travaillé dans les différents labos que j'ai fréquentés : Anne Bates, le regretté Mathieu Bazot, Bruno Bernazeau, Yvan Bouisson, Jean-François Bourdoncle, Arnaud Butier, Serge Carillo, Clément Enard, Patrice Lavene, Maryvonne Prunier, Jean-Luc Roger et Alain Sellier. Merci d'avoir été là non seulement pour préparer, entretenir, mesurer, semer, récolter, ranger, saisir, planifier, les parcelles, les données, les expérimentations, le matériel, les cultures (petit exercice : remettre les COD en face des verbes correspondants), mais aussi de m'avoir appris à reconnaître les adventices, les carabes, les maladies du blé, de la vigne, et de m'avoir forcée à rester raisonnable et les pieds sur terre (ou plutôt dans la boue) quand je voyais un peu trop grand.

Je suis sincèrement reconnaissante aux collègues scientifiques qui m'ont encadrée au début de ma carrière et qui ont été mes modèles, qu'ils soient remerciés pour leur qualité scientifiques et humaines : Philippe Lucas, le regretté Doug Bailey et Marie-Hélène Jeuffroy. Mais aussi aux collègues avec qui j'ai collaboré plus ou moins étroitement, mais qui m'ont tous apporté des points de vue intéressants, des idées nouvelles, des retours positifs sur l'intérêt de mon travail et la motivation pour continuer : Lionel Lebreton, Sylvain Poggi, Muriel Valantin-Morison, Dominique Desclaux, Fabrice Vinatier, Laure Hossard, ainsi que les membres des réseaux payote et COPACABANA et du RMT AgroforesterieS. Merci à Christian Gary grâce à qui j'ai pu migrer à Montpellier, à Eric Justes pour le lancement du projet biodiversify, qui est très structurant pour l'unité et en particulier pour l'équipe TEAM que j'anime.

Je remercie également chaleureusement les étudiants que j'ai encadrés, grâce à qui j'ai pu avancer plus vite et avec un enthousiasme renouvelé chaque année : Estelle, Maguie, Barthelemy, Anabelle, Céline, Thomas, Romane, Laura, Anaïs, Sacha, Alexandre et Florent. Et bien sûr les doctorants : Daniel Inurreta-Aguirre (le premier, ça ne s'oublie jamais) pour sa bonne humeur ; Guillaume Blanchet pour son opiniâtreté face aux difficultés techniques, aux ampoules et aux vêtements trempés (premier enseignement de sa thèse : travailler sur la sécheresse n'est pas une bonne façon de rester au sec) et sa persévérance à fouiller les données sous de multiples angles d'attaque jusqu'à trouver le bon cadre conceptuel ; Nicolas Barbault dont l'aventure ne fait que commencer mais qui montre déjà son enthousiasme et son sérieux et enfin Laëtitia Lemièrre, qui va être une passeuse de savoir entre l'agronomie et l'informatique. Nicolas et Laetitia, j'espère que je serai à la hauteur pour vous permettre de réaliser toutes vos potentialités.

Sommaire

I. CV	8
II. Liste des contrats de recherche	10
III. Liste des publications	10
IV. Liste des encadrements de doctorants et stagiaires	14
V. Liste des tâches collectives	16
VI. Analyse des travaux scientifiques	18
1. Introduction.....	18
2. La complexité de l'agroécologie	23
3. La modélisation permet-elle de gérer cette complexité ?.....	40
4. Conclusion	50
VII. Projet : le numérique au service de l'agroécologie	52
1. Développer un support de conception de systèmes agroforestiers	52
2. Evaluer des systèmes agroforestiers co-conçus par des acteurs.....	55
3. Permettre aux acteurs de se projeter dans l'avenir	56
4. Objets d'étude et projets associés.....	57
5. Modalités de l'encadrement des doctorants	60
VIII. Conclusion	64
IX. Références	66
X. Annexes	76

- Listes des encadrés, figures et tableaux

Encadrés (les encadrés illustrent, par des exemples issus de mon parcours, les concepts présentés dans le mémoire)

Encadré 1 : Typologie des interventions aux séminaires d'agroécologie de Montpellier	21
Encadré 2 : Effet des pratiques en interculture sur la structure spatiale et le développement des épidémies d'une maladie d'origine tellurique.....	24
Encadré 3 : l'allongement du délai de retour du blé : un moyen de faire d'une pierre deux coups pour lutter contre le piétin-échaudage ?	25
Encadré 4 : Dépendance au contexte climatique de l'effet de la structure spatiale du couvert sur le développement d'une maladie tellurique	26
Encadré 5 : Dépendance au contexte de l'effet de la compétition arbres-cultures	27
Encadré 6 : Interaction entre pratiques locales et du voisinage sur les dynamiques de bioagresseurs	29
Encadré 7 : Comment décrire le paysage et caractériser son effet sur les bioagresseurs et ennemis naturels ?.....	31
Encadré 8 : Mission Ecophyt'eau® : un outil de représentation et de conception collective de systèmes de culture ou de l'importance d'intégrer tous les acteurs dans un processus de conception.....	32
Encadré 9 Sélection participative de blé dur pour l'agroforesterie	34
Encadré 10 : Protection microclimatique des cultures en agroforesterie.....	37
Encadré 11 : Compétitions arbres-vigne.....	38
Encadré 12 : Une démarche pour intégrer la biologie des champignons, l'épidémiologie végétale et l'évolution des populations pour le contrôle durable des maladies d'origine tellurique.....	41
Encadré 13 : Application de la théorie de la hiérarchie pour mieux comprendre la dispersion des épidémies végétales	42
Encadré 14 : Un modèle spatialement explicite pour tester les effets combinés du type de semis et du type de travail du sol.....	44
Encadré 15 : Simulation de l'effet des interactions arbres-cultures sur le rendement du blé sous différents scénarios climatiques	46
Encadré 16 : MUSCLR-PODYAM : un cadre de modélisation pour construire des modèles de dynamiques de populations multi-espèces dans les mosaïques paysagères.....	49

Figures

Figure 1 : Rôle de l'agriculture dans le dépassement des limites planétaires (extrait de (Meier 2017)).....	19
Figure 2 : Disciplines des interventions présentées lors des séminaires d'agroécologie de Montpellier (sur un schéma adapté de Dalgaard et al 2003) d'après Checkland 1999..	22
Figure 3 : le piétin échaudage présente une structure en foyers de maladie (gauche et droite, les contrastes ont été accentués) dont la taille et la forme dépendent du type de travail du sol (photo centrale).....	24
Figure 4 : trade-off entre l'efficacité d'infection et la survie en phase saprophyte.....	26
Figure 5 : Évaluation expérimentale d'un levier original pour lutter contre une maladie tellurique : la structure spatiale de la culture (A : semis en poquets, B : semis en ligne et C : semis à la volée).....	27
Figure 6 : La compétition domine les interactions arbres-cultures en conditions optimales (l'année 2016 pour la figure de gauche, la situation de contrôle sans exclusion de pluie pour la figure de droite), mais pas lorsque les conditions sont défavorables à la culture.	

FS et AC : full sun et agricultural control, AF : agroforesterie, AF-S et AF-N : au Sud et au Nord de l'arbre.....	28
Figure 7 : Deux des 216 parcelles de blé ayant servi de support à l'étude sur les interactions entre pratiques locales et dans le voisinage : à gauche, parcelle en agriculture biologique, à droite, parcelle en agriculture conventionnelle	29
Figure 8 : A) méthode MAPI d'analyse génétique spatiale, B) résultats de la méthode MAPI, C) paysage utilisé pour les simulations de la dynamique spatiale d'un bioagresseur, D) buffers utilisés pour calculer la fonction d'influence spatiale (méthode SILand), E, F, et G) données spatiales (paysage + bioagresseurs) intégrées dans le package rcopacabana (Drouais, Dijon, haute vallée de la Durance).....	31
Figure 9 : Interface informatique créée pour apporter des fonctionnalités supplémentaires à l'outil "Mission Ecophyt'eau"	33
Figure 10 : Rendement normalisé en témoin culture pure et rendement relatif en agroforesterie des variétés populations (vert), lignées pures "élite"(bleu) et lignées pures de variétés anciennes (orange)	35
Figure 11 : A gauche, dégâts dus aux gelées du 21-24 Avril 2017, à droite, les vignes près des pins parasol n'ont pas été touchées (Photos C. Dupraz).	37
Figure 12 : Poids de vendange par cep en fonction de l'année, du cépage et du système de culture (AF : agroforesterie, TV : témoin viticulture pure).	39
Figure 13 : Démarche adoptée pour proposer de nouvelles méthodes de lutte contre les maladies d'origine tellurique.	41
Figure 14 : Représentation schématique du fonctionnement du modèle Cascade (Gosme and Lucas, 2009a, 2009b) et exemple de hiérarchie de niveaux d'organisations pour son application en épidémiologie végétale.....	42
Figure 15 : Un exemple de simulations très contrastées : structure de l'hôte aléatoire (semis à la volée) ou agrégée (semis en poquets) en interaction avec la structure spatiale de l'inoculum (qui pourrait dépendre du travail du sol pendant l'interculture, comme montré dans l'Encadré 2, bien que les modalités testées ici soient plus contrastées). .	45
Figure 16 : Simulations du rendement et sa variabilité (écart-type) en agroforesterie vs témoin agricole, pour trois scénarios climatiques et deux catégories d'âge des arbres	47
Figure 19 : Photomontage illustrant ce que pourrait donner l'application de réalité augmentée pour visualiser le système agroforestier nouvellement conçu ou nouvellement planté : aspect de la parcelle dans 10, 20, 30 ou 40 ans.	57
Figure 20 : Vignes associées à des pins pignon.....	58
Figure 21 : Systèmes agroforestiers à base d'oliviers : oliviers dispersés dans une parcelle de blé (A) et oliviers alignés, permettant une mécanisation des cultures intercalaires (B) ©Yann Arthus-Bertrand.....	58
Figure 22 : Schéma d'intégration de l'outil de réalité augmentée pour la conception "sur table", de la modélisation des systèmes agroforestiers et de la visualisation in situ. ESFM : ecosystem services functional motif (Rafflegeau et al. 2019).	60

Tableaux

Tableau 1 : Rendement en tonnes par hectare (prenant en compte la surface prise par les arbres) en vigne agroforestière (2 modalités de distance arbres-vigne) et en témoin viticole.....	39
Tableau 2 : vision des responsabilités : moyenne des pourcentages de mention par personne, selon que c'est un doctorant ou un encadrant qui répond (100 %= la personne ne parle que de cet aspect)	61

Annexes

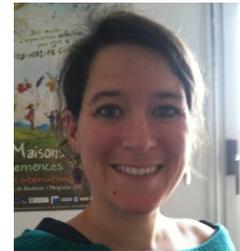
Annexe 1 : organigramme de l'unité ABSys.....	76
Annexe 2 : Méthodes utilisées pour caractériser l'effet du contexte paysager sur les populations de bioagresseurs ou d'auxiliaires.....	77
Annexe 3 : Tirés à part des principales publications.....	81

I. CV

Dr. Marie GOSME

Chargée de Recherches, INRAE

email : marie.gosme@inrae.fr



Diplômes

- 2007 **Doctorat en "Biologie et Agronomie", mention très honorable** – École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France
- 2003 **Master Professionnel "Protection des Plantes et Environnement"** – École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France
- 1999 **Concours d'entrée des Grandes Ecoles** – Lycée Henry IV, Paris, France
- 1997 **Baccalauréat, spécialité "mathématiques", mention bien** - Lycée Hélène Boucher, Paris, France

Responsabilités

Responsable de l'équipe TEAM (Transition Ecologique des Agrosystèmes Méditerranéens) de l'UMR ABSys (23 permanents)

Activités de recherche

Mécanismes de résilience des systèmes agroforestiers face à la variabilité climatique. (Juillet 2014- présent) – UMR SYSTEM, INRA Montpellier, France

- Montage de projets européens et nationaux
- Encadrement de deux thèses de doctorat
- Co-chair du comité scientifique du 3^{ème} congrès mondial d'agroforesterie 2019, éditrice en chef des actes du congrès européen d'agroforesterie 2016
- Conception, réalisation et analyse d'expérimentations sur cultures annuelles (céréales, pois) et pérennes (vigne) en agroforesterie
- Utilisation de modèles mécaniste des systèmes agroforestiers

Effet des systèmes de cultures dans un paysage sur la dynamique du profil de bioagresseurs du blé. (Mai 2008-Juin 2014) – UMR Agronomie, INRA Grignon, France

- Montage et participation à des projets européens et nationaux
- Enquêtes auprès d'agriculteurs
- Suivis en parcelles d'agriculteurs de bioagresseurs et auxiliaires du blé
- Modélisation spatialement explicite de dynamiques de populations

Analyse de l'invasion et de la persistance de maladies telluriques par modélisation des épidémies et de l'évolution de la structure génétique des populations pathogènes responsables. Post-doctorat (Mai 2007 – Avril 2008) – University of Cambridge, UK

- Approfondissements en modélisation épidémiologique et évolutive
- Conception, réalisation et analyse d'expérimentations en conditions contrôlées
- Utilisation du logiciel statistique R

Modélisation spatio-temporelle d'épidémies d'origine tellurique. Thèse de doctorat (Janvier 2004 - Janvier 2007) - INRA Rennes, France.

- Manipulation des concepts généraux de phytopathologie, épidémiologie et modélisation
- Conception, réalisation et analyse d'expérimentations en plein champ et en conditions contrôlées
- Utilisation de logiciels et plateformes de modélisation, logiciel statistique SAS
- Membre du comité d'organisation du 9^{ème} Atelier International d'Épidémiologie Botanique (Landerneau, France, 2004)

Analyse spatiale du piétin-échaudage du blé. Stage de fin d'études d'ingénieur (Mars-Septembre 2003) - INRA Rennes, France.

- Échantillonnage au champ, notations de maladie, analyses statistiques

- *Utilisation du logiciel statistique SAS et d'outils d'analyse spatiale*

Mise en place d'un test précoce de dépistage de la résistance du cacaoyer à la maladie du balai de sorcières (Avril-Août 2002) - University of the West Indies, Port of Spain, Trinidad.

- *Techniques de pathologie végétale : échantillonnage, extraction, observations microscopiques*
- *Travail en milieu anglophone*

Agro-épuration des vinasses de distillerie sur l'île de La Réunion. (Septembre 2001-Mars 2002) - CIRAD Saint Denis, La Réunion.

- *Carottage de sol, analyses physico-chimiques de sol et de vinasses, mise en place d'expérimentations au champ et en conditions contrôlées*

Autres expériences professionnelles

Gestion de la forêt et de la biodiversité au Costa Rica (Avril 2001), Costa Rica

Développement rural en Indonésie (Juin-Juillet 2000), Manado, Indonésie

Stage en exploitation agricole (Avril et Août 2000), Cognac, France

Informatique

- statistiques : SAS, R
- modélisation : Stella, ModelMaker, Simile, Record, livecode
- langages de programmation : C++, Tcl/Tk
- logiciel SIG : qGIS

Langues

Anglais : courant (640 points au TOEFL et 955 points au TOEIC), plus d'un an d'expérience professionnelle en milieu anglophone

Loisirs

Apnée : niveau 3 (2015)

Plongée sous-marine : Plongeur niveau 2 (2010), Encadrant niveau 1 (2012)

Pilotage planeur : Licence de Pilote de Planeur (2003)

Pilotage avion : Licence de Pilote Privé Avion (2001)

II. Liste des contrats de recherche

années	titre	financeur	montant (k€)	rôle
2010-2014	SOLIBAM (Strategies for Organic and Low-input Integrated Breeding and Management)	Europe	7800	participante
2011-2013	EPSIMBIOR (Etude préalable à la conception d'un modèle simulant l'effet de systèmes de culture agencés dans l'espace sur les pressions biotiques à l'échelle régionale)	GIS GC-HP2E	127	coordinatrice
2012-2016	GESTER (Gestion territoriale des résistances aux maladies en réponse aux nouvelles contraintes d'utilisation des pesticides en grande culture.)	ANR	515	responsable de work-package
2013-2016	COPACABANA (Comment décrire le Paysage pour Caractériser son effet sur les BioAgresseurs et ennemis Naturels ?)	métaprogramme INRA SMACH	70	coordinatrice
2014-2017	AGFORWARD (AGroFORestry that Will Advance Rural Development)	Europe	7000	participante
2015-2021	BAG'AGES (Bassin Adour-Garonne, quelles performances des pratiques AGroEcologiqueS)	Agence de l'eau Adour-Garonne	510	participante
2018-2021	Arbriss'eau (L'agroforesterie au sein de pratiques agroécologiques pour la préservation de l'Eau)	Agence de l'eau RMC	300	participante
2018-2021	Sun'Agri 3 (agrivoltaïque dynamique)	ADEME	15200	participante
2018-2022	D4Declic (Dual cropping system, Genetic Diversity, Decision support and Digital tool for Designing Eco-efficient Cereal-Legume Integrated food value Chain in the Mediterranean Basin)	ANR	463	coordinatrice (remplacement de la coordinatrice initiale)
2020-2023	Biodiversify (Boost ecosystem services through highly Biodiversity-based Mediterranean Farming sYstems)	ANR	1300	responsable de WP
2020-2023	RASCAS (La Réalité Augmentée comme Support pour la Conception de systèmes AgroforestierS)	#DigitAg/INRAE	130	coordinatrice
2020-2023	MODOLIVIER (Modélisation de systèmes agroforestiers à base d'oliviers pour évaluer ex-ante la multifonctionnalité de systèmes co-conçus avec des acteurs)	Fondation de France	105	coordinatrice
2020-2024	AGROMIX (AGROforestry and MIXed farming systems - Participatory research to drive the transition to a resilient and efficient land use in Europe)	Europe	7000	participante

III. Liste des publications

Publications dans des revues internationales à comité de lecture (les co-auteurs stagiaires de M2 ou doctorants que j'encadrerais sont soulignés). Les indicateurs de notoriété indiqués en couleur sont ceux de l'évaluation des revues NORIA.

1. **Gosme, M.**, Willocquet, L., and Lucas, P. (2007) Size, Shape and Intensity of Aggregation of Take-all Disease during Natural Epidemics in Second Wheat Crops.

- Plant Pathology*, **56**: 87-96. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2006.01503.x (FI 2,178, **excellente**: agronomy)
2. Lebreton, L., **Gosme, M.**, Philippe Lucas, Guillerm-Erckelboudt, A.-Y. and Sarniguet, A. (2007) Linear relationship between *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (Ggt) genotypic frequencies and disease severity on wheat roots in the field. *Environmental Microbiology*, **9**: 492-499. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2006.01166.x (FI 5,337, **excellente**: microbiology)
 3. **Gosme, M.** (2008) Comment analyser la structure spatiale et modéliser le développement spatio-temporel des épiphyties?. *Canadian Journal of Plant Pathology* **30**: 4-23 DOI: 10.1080/07060660809507492 (FI 1,01, **acceptable**: plant sci.)
 4. **Gosme, M.** and Lucas, P. (2009) Cascade: an epidemiological model to simulate disease spread and aggregation across multiple scales in a spatial hierarchy. *Phytopathology* **99**: 823-832. DOI: 10.1094/PHYTO-99-7-0823 (FI 2,618, **excellente**: plant sci.)
 5. **Gosme, M.** and Lucas, P. (2009) Disease spread across multiple scales in a spatial hierarchy: effect of host spatial structure, and of inoculum quantity and repartition. *Phytopathology* **99**: 833-839 DOI: 10.1094/PHYTO-99-7-0833 (FI 2,618, **excellente**: plant sci.)
 6. **Gosme, M.** and Lucas, P. (2009) Combining experimentation and modelling to estimate primary and secondary infections of take-all disease of wheat. *Soil Biology and Biochemistry* **41**: 1523-1530 DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.04.012 (FI 3,566, **excellente**: soil sci.)
 7. **Gosme, M.**, Suffert, F. and Jeuffroy, M.H. (2010) Intensive versus low-input cropping systems: what is the optimal partitioning of agricultural area in order to reduce pesticide use while maintaining productivity? *Agricultural Systems* **103**: 110-116 DOI: 10.1016/j.agsy.2009.11.002 (FI 2,856, **excellente**: agric. multidiscip.)
 8. **Gosme, M.**, Lucas, P. (2011) Effect of host and inoculum patterns on take-all disease of wheat incidence, severity and disease gradient. *European Journal of Plant Pathology* **129**, 119-131. DOI: 10.1007/s10658-010-9700-3 (FI 1,87, **correcte**: agronomy)
 9. Médiène, S., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.P., de Tourdonnet, S., **Gosme, M.**, Bertrand, M., Roger-Estrade, J., Aubertot, J.N., Rusch, A., Motisi, N., Pelosi, C., and Doré, T. (2011) Agroecosystem management and biotic interactions: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 31(3): 491-514. DOI 10.1007/s13593-011-0009-1 (FI 2,562, **excellente**: agronomy)
 10. **Gosme, M.**, de Villemandy, M., Bazot, M., Marchand, D., Jeuffroy, M.-H. (2012) Local and neighbourhood effects of organic and conventional wheat management on aphids, weeds, and foliar diseases. *Agriculture, Ecosystems, Environment*. 161: 121-129. DOI: 10.1016/j.agee.2012.07.009 (FI 3,969, **exceptionnelle**: agric. multidiscip.)
 11. Vinatier, F. **Gosme, M.**, Valantin-Morison, M. (2012) A tool for testing integrated pest management strategies on a tritrophic system involving pollen beetle, its parasitoid and oilseed rape at the landscape scale. *Landscape Ecology*, 27(10) 1421-1433. DOI: 10.1007/s10980-012-9795-3 (FI 3,83, **correcte**: ecology)
 12. Vinatier, F. **Gosme, M.**, Valantin-Morison, M. (2012) Explaining host-parasitoid interactions at the landscape scale: a new approach for calibration and sensitivity analysis of complex spatio-temporal models. *Landscape Ecology*, 28(2): 217-231. DOI: 10.1007/s10980-012-9822-4 (FI 3,83, **correcte**: ecology)

13. Jeuffroy M.H., Baranger E., Carrouée B., de Chezelles E., Gosme M., Hénault C., Schneider A., Cellier P., (2013). Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, rapeseed and dry pea. *Biogeosciences*, 10, 1787-1797 DOI: 10.5194/bg-10-1787-2013 (FI 4,193, **excellente**: ecology)
14. **Gosme, M.**, Lebreton, L., Sarniguet, A., Lucas, P., Gilligan, C.A., Bailey, D. J., (2013). A new model for the pathozone of the take-all pathogen, *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. *Annals of Applied Biology* 163, 359–366. DOI: 10.1111/aab.12060 (FI: 1,681, **excellente**: agric. multidiscip)
15. Hossard, L., **Gosme, M.**, Souchère, V., Jeuffroy, M.H., (2015) Linking Cropping System Mosaics to Disease Resistance Durability. *Ecological Modelling* 307: 1–9. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.03.016 (FI 2,321, **correcte**: ecology)
16. Garcia de Jalon S., Burgess P.J., Graves, A., Moreno G., Pottier, E., Novak, S., Bondesan, V., Mosquera Losada, R., Crous-Duran, J., Palma, JHN, Paulo, J., Oliveira, T., Cirou, E., Hannachi, Y., Pantera, A., Wartelle, R., Kay, S., Malignier, N., Van Lerberghe, P., Tsonkova, P., Mirck, J., Rois, M., Kongsted, A.G., Thenail, C., Luske, B., Berg, S., **Gosme, M.**, McAdam, J., Vityi, A. (2017). How Is Agroforestry Perceived in Europe? An Assessment of Positive and Negative Aspects by Stakeholders. *Agroforestry Systems*, DOI: 10.1007/s10457-017-0116-3. (FI 1.973, **correcte**: agronomy)
17. Camara, B., **Gosme, M.**, Ngom, D., Gomis, Z.D., Badji, M., Sanogo, D., and Dupraz, C. (2018). Ecological characterization and evolution of *Elaeis guineensis* Jacq. traditional parklands in Lower Casamance (Senegal). *Agroforestry Systems*. DOI: 10.1007/s10457-018-0237-3 (FI 1.973, **correcte**: agronomy)
18. Dupraz, C., Blitz-Frayret, C., Lecomte, I., Molto, Q., Reyes, F. and **Gosme, M.** (2018). Influence of Latitude on the Light Availability for Intercrops in an Agroforestry Alley-Cropping System. *Agroforestry Systems*, March 2, 2018. DOI: 10.1007/s10457-018-0214-x. (FI 1.973, **correcte**: agronomy)
19. Inurreta-Aguirre, H.D., Lauri, P.E., Dupraz, C., and **Gosme, M.** (2018). Yield Components and Phenology of Durum Wheat in a Mediterranean Alley-Cropping System. *Agroforestry Systems*. DOI: 10.1007/s10457-018-0201-2. (FI 1.973, **correcte**: agronomy)
20. Christian Dupraz, Kevin Wolz, Isabelle Lecomte, Grégoire Talbot, Grégoire Vincent, Rachmat Mulia, François Bussièrre, Harry Ozier-Lafontaine, Sitraka Andrianarisoa, Nick Jackson, Gerry Lawson, Nicolas Dones, Hervé Sinoquet, Betha Lusiana, Degi Harja, Susy Domenicano, Francesco Reyes, **Marie Gosme**, Meine Noordwijk (2019). Hi-sAFé: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability*, 11 2293, DOI: 10.3390/su11082293 (FI: 2,576 **correcte**: environ.sci.)
21. Lydie Dufour, **Marie Gosme**, Jimmy Le Bec, Christian Dupraz (2020). Does pollarding trees improve the crop yield in a mature alley-cropping agroforestry system?. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1-10, DOI: 10.1111/jac.12403 (FI 3,057 **excellente**: agronomy)
22. Anne Merot, Marc Fermaud, **Marie Gosme**, Nathalie Smits (2020). Effect of conversion to organic farming on pest and disease control in French vineyards. *Agronomy*, 10 1-18, DOI: 10.3390/agronomy10071047 (FI 2.259 **excellente**: agronomy)
23. Hector Daniel Inurreta-Aguirre, Pierre-Eric Lauri, Christian Dupraz and **Marie Gosme**, (révisions majeures à Agricultural Water Management) Tree root pruning increases soil water content but not crop yield in winter cereals in a Mediterranean alley cropping system.

24. Guillaume Blanchet, Karim Barkaoui, Mattia Bradley, Christian Dupraz and **Marie Gosme** (soumis à Journal of Agronomy and Crop Science, accepté avec modifications) Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea - an assessment with a rainfall manipulation experiment in a 25-year-old walnut agroforestry system.

IV. Liste des encadrements de doctorants et stagiaires

Doctorants :

doctorant	années	sujet	publications associées	présentations à des congrès
Daniel Innurreta	Oct 2015- Nov 2018	Looking for facilitation in agroforestry: can trees reduce terminal water and heat stress in winter cereals in the Mediterranean climate? An experimental and modelling approach	publications 19 et 23 dans la liste des publiés page 10	H.D. Inurreta Aguirre, Kévin Wolz, Christian Dupraz, Marie Gosme (2019-05-20). Using the Hi-sAFe model to test the effect of tree root and branch pruning with different crop management options. Presented at : 4. World Congress of Agroforestry, Montpellier, fr (2019-05-20 - 2019-05-22) Hector Daniel Inurreta Aguirre, Lydie Dufour, Christian Dupraz, Pierre-Eric Lauri, Marie Gosme (2016-05-23). Effect of agroforestry on phenology and components of yield of different varieties of durum wheat. Presented at : 3. European Agroforestry Conference (EURAF 2016), Montpellier, fr (2016-05-23 - 2016-05-25)
Guillaume Blanchet	Oct 2017- présent	Les systèmes agroforestiers face au changement climatique : analyses des mécanismes de résilience face aux excès climatiques par expérimentation au champ et modélisation numérique	publication 24 dans la liste des publiés page 10	Guillaume Blanchet, Marie Gosme, Jean-Francois Bourdoncle, Alain Sellier, Lydie Dufour, Grégoire Vincent, Christian Dupraz (2019). Drought experiments in alley-cropping systems, from concepts to field reality: lessons learnt at Restinclières, France. Presented at : 4. World Congress on Agroforestry, Montpellier, fr (2019-05-20 - 2019-05-22) Guillaume Blanchet, Marie Gosme, Lydie Dufour, Jean-Francois Bourdoncle, Alain Sellier, Christian Dupraz (2018) Will cereal crops better cope with climate change in agroforestry? A first assessment with a rain reduction experiment in a mature alley-cropping system. Presented at : XVe European Society for Agronomy Congress, Geneva, Switzerland

Devenir des doctorants : Daniel Innurreta est chercheur à l'INIFAP au Mexique. Guillaume Blanchet est encore en thèse.

Etudiants

étudiant	niveau	année	sujet	publication/ communication associée
Florent Deslandes	M2	2020	Viticulture agroforestière : comportement de la vigne à l'ombre de pins parasol	

Alexandre Tallaa	M2	2020	La réalité augmentée pour faciliter les ateliers de conception de systèmes agroforestiers	Gosme M, Tallaa A, Jaeger M. Augmented reality to support the design of innovative agroforestry systems. résumé soumis pour la conférence de l'EURAF initialement prévue en 2020
Sacha Delmotte	M1	2019	Influence des arbres sur la culture de vignes en agroforesterie viticole	Marie Gosme, Sacha Delmotte, Juliette Grimaldi, William Trambouze. 2019. Diachronic study of the effect of growing trees on grapevine yield: 24 years of experience in the South of France. Présentation orale au 3ème congrès mondial d'agroforesterie, Montpellier 2019
Anais Hubert	M2	2017	Plasticité phénotypique des céréales en réponse à la culture en agroforesterie en région méditerranéenne	
Laura Cervello	M2	2016	Screening de variétés de blé dur adaptées à l'agroforesterie	
Romane Leroy	L2	2015	Screening de variétés de blé dur adaptées à l'agroforesterie	
Thomas Brequigny	césure	2014	Comparaison et évaluation de protocoles caractérisant les populations de bioagresseurs et leurs régulations biologiques	
Céline Colombet	L2	2013	Les effets des aménagements paysagers sur les populations de bioagresseurs et d'auxiliaires	
Anabelle Laurent	M2	2012	Effet de la présence de haies sur les populations de carabes dans les parcelles de blé et en bord de champ	
Barthelemy Chenaux	césure	2011	Effets du type de blé (paysan vs moderne) sur l'efficacité des régulations biologiques offertes par les espaces interstitiels en système Bio	
Maguie De Villemandy	M2	2010	Caractérisation du profil de maladies, populations d'adventices et infestations de puceron dans des parcelles de blé.	publication 10 dans la liste des publis page 10
Estelle Kydjian	licence pro	2009	Caractérisation du profil de maladies, populations d'adventices et infestations de puceron dans des parcelles de blé.	

Participations à des comités de pilotage de thèse (hors thèses encadrées)

doctorant	années	titre
Toky Ramananjatovo	2018-2021	Systèmes verger-maraîcher : recherche appliquée dans le continuum sol-plante-atmosphère
Nirina Ratsimba	2016-2019	Conception d'un modèle simulant de manière spatialement explicite les services de régulation biologique et de pollinisation, à l'échelle du paysage
Juliette Grimaldi	2014-2017	Quel est l'apport de l'agroforesterie face au risque climatique en régions tempérées ? Développement d'une approche combinant mesures in situ, télédétection et analyse morphologique de la végétation
Stéphanie Klaedtke	2013-2016	Plant adaptation and plant health in a context of on-farm breeding of common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>) in European organic farms.
Camille Puech	2011-2014	Rôle de la diversité et de l'organisation spatiale des pratiques en agriculture biologique et conventionnelle pour le contrôle biologique des ravageurs
Marie-Hélène Bonnemé	2010-2014	Analyse et modélisation des effets du système de culture et de l'environnement de production sur le profil de dégâts du blé d'hiver
Melen Leclerc	2010-2013	Approche par modélisation et expérimentation du développement spatio-temporel des maladies telluriques : le cas du pathosystème betterave à sucre - <i>Rhizoctonia solani</i>
Julien Papaix	2009-2011	Dynamique et évolution génétique d'une population d'un champignon phytopathogène anémophile en réponse à la structure spatiotemporelle de son hôte.
Julie Caubel	2009-2011	Typologie des maladies et ravageurs des principales cultures et modélisation des effets du changement climatique sur leur évolution à l'échelle de l'ensemble du territoire français
Béatrice Collange	2008-2011	Vers une gestion agronomique des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abri : évaluation de systèmes de culture
Elise Lô-Pelzer	2005-2008	Modélisation des effets des systèmes de culture et de leur agencement dans l'espace sur l'adaptation des populations de <i>Leptosphaeria maculans</i> aux résistances présentes dans les variétés de colza et sur les pertes de rendement

V. Liste des tâches collectives

Liste des responsabilités (hors management de projet, qui sont listés dans le tableau page 10)

Responsabilité	Année
----------------	-------

Responsable de l'équipe TEAM (transition écologique des agrosystèmes méditerranéens) au sein de l'UMR ABSys. 23 permanents et une dizaine de doctorants, postdocs et CDD.	2020-2025
Co-présidente du comité scientifique et membre du comité d'organisation du congrès mondial d'agroforesterie 2019 (1200 participants)	2019
Présidente du comité scientifique et éditrice en chef des actes du congrès européen d'agroforesterie 2016 (300 participants)	2016

VI. Analyse des travaux scientifiques

Dans cette partie, j'ai pris le parti de défendre une thèse (cf. ci-dessous) en m'appuyant sur une revue de la littérature et d'illustrer mon propos par des exemples tirés de mon expérience professionnelle, présentés sous forme d'encadrés. J'espère que ce format facilitera la lecture et la rendra plus agréable et intéressante qu'une présentation exhaustive de mes travaux.

Je défends la thèse que les problèmes (agronomiques, économiques, sociaux) de l'agriculture intensive sont dus à la vision de l'agriculture comme un procédé industriel, qui doit être rationalisé (on pourrait dire réduit à sa plus simple expression) et standardisé (on pourrait dire déconnecté de l'environnement) pour simplifier sa gestion (par des méthodes qu'on pourrait qualifier de brutales). Je pense qu'au contraire il faut faire non pas contre mais avec la nature. L'agroécologie, à la fois comme science ayant pour domaine d'étude des systèmes complexes et comme pratique reposant sur la biodiversité, permet de sortir de cette vision simpliste. Mais l'agroécologie reposant sur une complexification des agrosystèmes dans leur structure et dans leur pilotage par les agriculteurs, il faut donc utiliser des outils adaptés pour gérer cette complexité et rendre intelligible le fonctionnement des agrosystèmes. La modélisation apporte de tels outils, mais on se rend compte que la connaissance du fonctionnement des agrosystèmes ne suffit pas à faire changer les pratiques des agriculteurs. Le projet que je présenterai dans la partie suivante vise donc à proposer des outils qui pourraient être utilisés dans le cadre de démarches participatives de conception de nouveaux systèmes plus durables et plus résilients, produisant et valorisant les services écosystémiques.

1. Introduction

La "**modernisation**" de l'agriculture lors de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, basée sur la motorisation (et son corollaire, le remembrement), l'utilisation de pesticides chimiques, la sélection de variétés de plantes et d'animaux très productives, la fertilisation chimique et l'irrigation, associées à une "rationalisation" de l'activité agricole et à une spécialisation des exploitations, ont permis une augmentation spectaculaire de la production alimentaire. La productivité des cultures de céréales dans le monde a ainsi pu augmenter de près de 44 kg.ha⁻¹ chaque année entre 1961 et 2006, doublant en quarante ans, entre 1966 et 2006 (Source : FAOstats, 2008). Cependant, ce modèle de développement agricole, basé sur la recherche d'un contrôle le plus poussé possible des conditions de production et l'utilisation massive d'intrants, **a atteint ses limites** et ses impacts négatifs sont de plus en plus largement reconnus.

Les limites de l'intensification agricole sont à la fois internes et externes :

- les limites internes conduisent à des **impasses techniques**, comme le contournement des résistances variétales (Rouxel et al. 2003; Papaix et al. 2011), l'apparition de résistances aux pesticides chez les bioagresseurs (Beckert et al. 2011), la raréfaction des ressources, en particulier l'eau dans les régions d'irrigation intensive (Amigues et al. 2006), ou la dégradation du sol (Montgomery 2007; Virto et al. 2014) mais aussi à des **verrouillages sociotechniques** qui empêchent les solutions alternatives, pourtant plus performantes, d'être adoptées (Vanloqueren and Baret 2008)
- les externalités négatives sont de moins en moins tolérées par la société et les agriculteurs : risques des pesticides pour la **santé humaine** (producteurs et consommateurs) et **l'environnement** (toxicité pour les organismes non-cibles tels que les pollinisateurs et autres organismes sauvages, contamination des sols, de l'eau

et de l'air pouvant aller jusqu'à remettre en cause le fonctionnement de l'écosystème) (Aubertot et al. 2005), perte de **biodiversité** liée à l'intensification agricole et à la simplification des paysages (Le Roux et al. 2008), **pollutions** dues à la surfertilisation (Romero et al. 2016), émissions de gaz à effet de serre (IPCC 2014). Ainsi, parmi les 6 "limites planétaires" (Steffen et al. 2015) déjà dépassées (sur 10), 4 le sont du fait de l'agriculture (Figure 1)

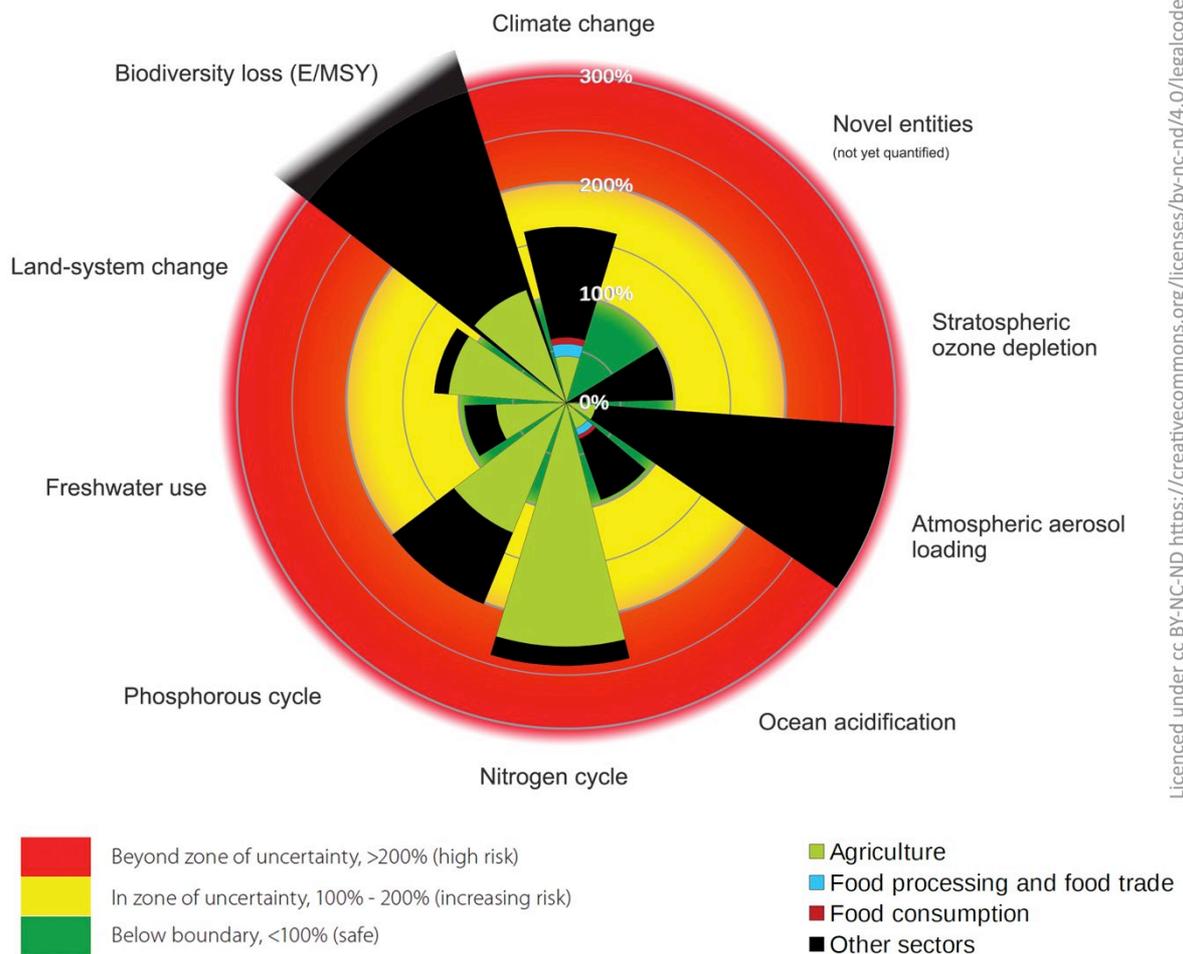


Figure 1 : Rôle de l'agriculture dans le dépassement des limites planétaires (extrait de (Meier 2017))

On parle souvent de la **dépendance aux intrants de l'agriculture**. Mais le terme de dépendance est-il approprié ? La classification internationale des maladies (CIM10), dans son chapitre sur la santé mentale, autorise à poser un diagnostic certain de dépendance si au moins 3 des critères suivants sont vérifiés. Examinons la situation du patient "agriculture industrielle" :

- désir puissant ou compulsif d'utiliser une substance. Plusieurs études ont montré que les agriculteurs conventionnels utilisent plus de pesticides, et à des dates plus précoces, que les recommandations des outils d'aide à la décision (Shtienberg 2013; Möhring et al. 2020)
- altération de la capacité à contrôler l'utilisation de la substance, caractérisée par des difficultés à s'abstenir initialement d'une substance, à interrompre sa consommation ou à contrôler son utilisation. Malgré les tentatives de réduction des produits

phytosanitaires (rappelez-vous 2007, le Grenelle de l'environnement, et l'année suivante le Plan Ecophyto, qui devait permettre de réduire de 50% l'utilisation des pesticides en 10 ans, soit en 2018), la consommation de pesticides à l'échelle nationale, mesurée par l'indicateur NODU, a augmenté (+ 25 % en 2016-2018 par rapport à 2009-2011) (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation 2020).

- syndrome de sevrage. La perte de biodiversité, non seulement au sein de la faune auxiliaire mais aussi en termes de diversité génétique des cultivars (Bonnin et al. 2014) rend l'agriculture plus sensible aux épidémies de maladies des plantes et aux pullulation d'insectes ravageurs (Marshall 1977), l'agriculture ne peut donc plus se passer de pesticides (y compris en bio, qui utilise des pesticides, certes non chimiques, mais pesticides quand même). De même, la diminution de la fertilité naturelle des sols (par érosion, diminution de la teneur en matière organique, altération de la structure du sol...) conduit à diminution des rendements, par exemple une perte de 10 cm de sol s'accompagne en moyenne d'une perte de 4% de rendement (Bakker et al. 2007) (NB : ces mêmes auteurs concluent que l'érosion ne menace pas la productivité agricole en Europe, parce qu'ils font l'hypothèse "raisonnable" que la diminution de la disponibilité de nutriments sera compensée par une augmentation de la fertilisation (cf. point suivant).
- besoin d'une quantité plus importante de la substance pour obtenir l'effet désiré. L'apparition de résistances aux pesticides oblige à augmenter les doses et/ou à multiplier les traitements avec des molécules alternatives, la perte de fertilité du sol conduit à une augmentation des fertilisants pour compenser cette perte.
- désinvestissement progressif des autres activités et augmentation du temps passé à se procurer la substance. Les raisons qui conduisent au déséquilibre d'investissement entre la recherche sur les biotechnologies et la recherche sur l'agroécologie sont nombreuses (Vanloqueren and Baret 2009), et le constat est toujours valable 11 ans plus tard : environ 80 % des fonds de l'union européenne visent toujours des programmes et des projets axés sur l'agriculture conventionnelle et/ou des approches axées sur l'efficacité des intrants (Moeller 2020)
- poursuite de la consommation de la substance malgré la survenue de conséquences manifestement nocives. Nous avons vu dans l'introduction quelques exemples de dommages environnementaux et de risques pour la santé humaine de l'utilisation excessive d'intrants, et ce constat n'est pas nouveau (Carson 1962).

Tous les critères étant vérifiés, on peut clairement poser un diagnostic de dépendance des systèmes agricoles industriels aux intrants.

Plusieurs voies sont possibles pour **sortir de cette impasse**. Il y a la voie du toujours plus technologique : biotechnologies pour créer des plantes résistantes aux maladies ou à la sécheresse, chimie pour développer de nouvelles molécules pesticides plus efficaces et plus spécifiques, guidage satellite pour optimiser la fertilisation... sans remettre en cause le système agricole ni ses objectifs. Mais comme (ne) l'a (pas) dit Einstein, "la folie, c'est de refaire toujours la même chose en espérant des résultats différents". Or le problème vient du paradigme du développement agricole d'après-guerre : pour faire entrer l'agriculture dans l'ère moderne, on a voulu lui appliquer les mêmes principes qui ont fait le succès de l'industrie, c'est à dire rationaliser les process en les simplifiant au maximum (puisque c'est la plante cultivée qui produit, pourquoi tolérer la présence d'autres plantes?), s'affranchir des conditions locales (par exemple par l'irrigation ou au contraire le drainage artificiel des

parcelles), ce qui permet une standardisation des itinéraires techniques et chercher, à chaque problème, en particulier phytosanitaire, la solution la plus efficace, en l'occurrence un pesticide. Sans rejeter les innovations technologiques, il faut donc **arrêter de chercher une solution unique** à chaque problème, et **considérer le système dans son ensemble** pour (re)concevoir des systèmes (par exemple des systèmes de culture) plus durables.

L'agroécologie est une piste intéressante pour changer de paradigme et passer du paradigme de la simplification au paradigme de la complexité (Lauri 2017). L'objectif est bien de produire autrement, pour le développement durable d'une agriculture plus productive et plus riche en biodiversité, qui évitera et atténuera les effets négatifs des pratiques développées au cours des décennies précédentes (Schutter and Vanloqueren 2011). L'agroécologie est une discipline scientifique au carrefour de l'agronomie et de l'écologie, ainsi que la somme des pratiques qui en découlent. C'est aussi un mouvement social qui interroge la relation entre l'agriculture et la société (Wezel et al. 2009). L'agroécologie est un nouveau paradigme qui vise à valoriser les processus biologiques pour couvrir à la fois les attentes de production et l'ensemble des autres services écosystémiques fournis par les agrosystèmes (Caquet et al. 2019) et, par conséquent, réduire considérablement l'utilisation d'intrants externes (Wezel et al. 2015). D'autres termes similaires sont l'agriculture durable, l'intensification écologique ou agriculture écologiquement intensive (Griffon 2013); l'agroécologie peut également emprunter au concept d'ingénierie écologique (Rey et al. 2014). En réalité, il n'existe pas une définition unique de l'agroécologie, et l'un des défis de l'agroécologie en tant que science est de définir ses propres limites et ses concepts fondamentaux (Wezel et al. 2018). La diversité des disciplines alimentant l'agroécologie est illustrée dans l'Encadré 1.

Encadré 1 : Typologie des interventions aux séminaires d'agroécologie de Montpellier

De 2011 à 2018, un groupe de chercheurs de plusieurs unités du CIRAD et de l'INRA a organisé un cycle de séminaires mensuels sur l'agroécologie. Au total, près de 80 exposés ont été présentés pour éclairer différents aspects de l'agroécologie (Figure 2). J'ai fait partie du comité d'organisation à partir de 2014.

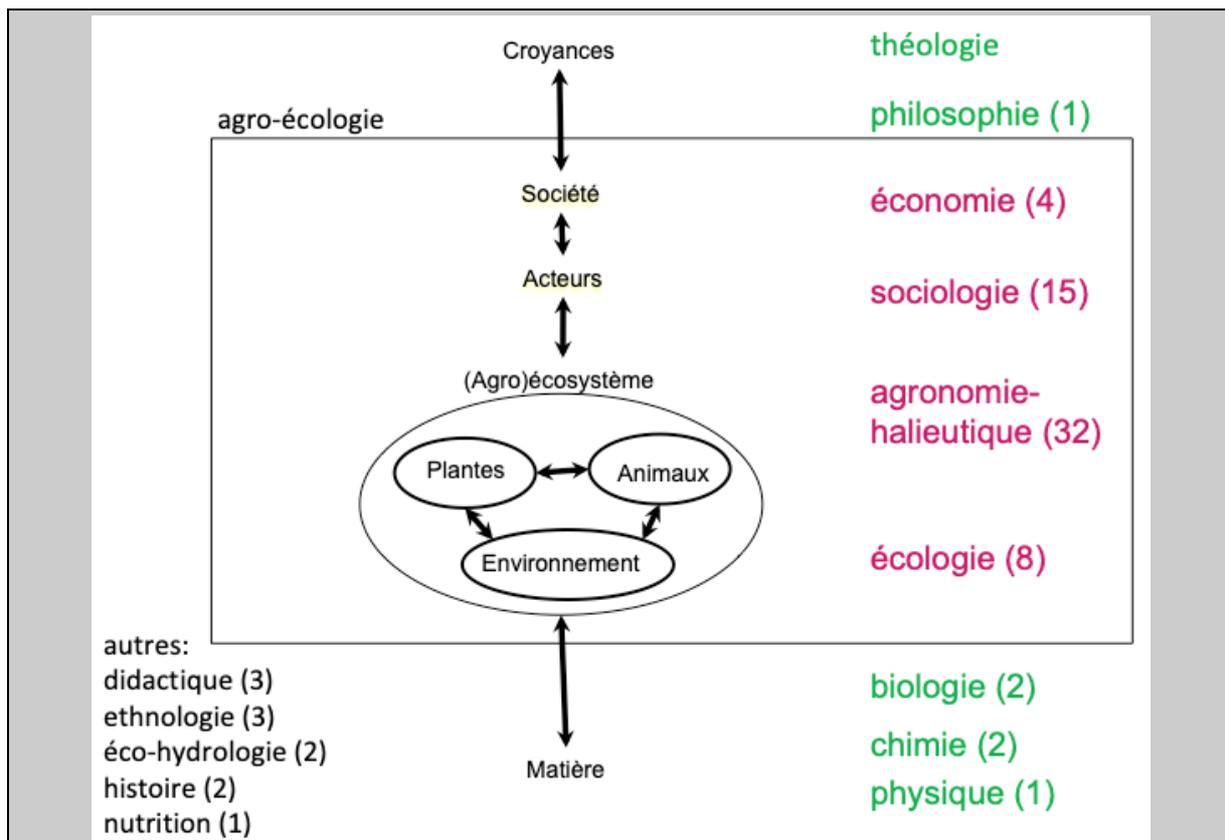


Figure 2 : Disciplines des interventions présentées lors des séminaires d'agroécologie de Montpellier (sur un schéma adapté de Dalgaard et al 2003) d'après Checkland 1999.

Bien que le classement de chaque intervention dans une discipline particulière soit à la fois difficile et critiquable du fait de l'approche nécessairement pluridisciplinaire de l'agroécologie, j'ai recensé les disciplines suivantes : agronomie (31), sociologie (15), écologie (8), économie (4), didactique (3), chimie (2), éco-hydrologie (2), ethnologie (2), histoire (2), biologie (1), ethnobiologie (1), halieutique (1), microbiologie (1), nutrition (1), philosophie (1), physique (1). Il est étonnant qu'il y ait finalement si peu d'interventions relevant de l'écologie, mais c'est peut-être un biais de classement dû au fait que les écologues ont pu insister dans leurs présentations sur les applications agronomiques de leurs travaux.

La liste complète des séminaires (ainsi que les vidéos) sont disponibles à l'adresse <https://www.agropolis.fr/agronomie/liste-seminaires.php>

Au niveau des pratiques, l'agroécologie n'est pas, contrairement à l'agriculture biologique par exemple, définie par un cahier des charges, mais plutôt par les **objectifs visés** (Claveirole 2016) : utilisation des processus écologiques et valorisation de l'agrobiodiversité pour (i) optimiser le rendement de la photosynthèse sur la surface cultivée en limitant les externalités négatives, (ii) améliorer le capital sol en le protégeant et en augmentant son taux de matière organique et (iii) réduire progressivement tous les recours aux intrants. Les **techniques** souvent regroupées sous le terme d'agroécologie sont :

- l'agroforesterie qui met en valeur l'arbre et la haie comme des alliés précieux de la fertilité et de la protection des cultures et des animaux
- les techniques simplifiées de travail du sol ; les couvertures permanentes des sols, les semis sous couverts et le retour au sol d'une partie de la biomasse

- les rotations longues et les diversifications des cultures, en particulier lorsqu'elles impliquent d'introduire des légumineuses
- l'élevage en plein air et le pâturage en système herbagé, notamment liés à la présence d'arbres et de haies pour le confort animal
- la polyculture/élevage qui favorise le bouclage des cycles des nutriments
- le contrôle biologique par conservation, qui consiste à créer des habitats favorables aux ennemis naturels des ravageurs.

La **reconnaissance** politique des potentialités de l'agroécologie est **récente**, que ce soit au niveau national (Claveirole 2016) ou au niveau international (IPES-Food 2016) ; elle suit une reconnaissance institutionnelle à peine plus ancienne : ainsi, le chantier "agroécologie" de l'INRA n'a vu le jour qu'en 2011. Auparavant, cette approche était beaucoup moins présente dans le champ politique, comme dans le champ de la recherche. Cela était dû en partie au faible niveau de financement de la recherche en agroécologie et à son incompatibilité avec les systèmes agricoles existants, mais aussi parce qu'elle nécessite des études à une large échelle et/ou sur des temps longs, avec des effets difficiles à quantifier et à publier car elle repose sur la compréhension de **systèmes complexes** (Vanloqueren and Baret 2009). Un système complexe est un système constitué de multiples composants en interaction les uns avec les autres, ce qui crée des boucles de rétroaction et fait que le comportement du système n'est pas prévisible à partir des caractéristiques individuelles de ses éléments. Dans le cas de l'agroécologie, cette complexité se manifeste sous trois formes, qui ont chacune des conséquences à la fois sur la façon de faire de la science en agroécologie et sur la pratique des agriculteurs : effets partiels, interactions entre pratiques et entre éléments du système, et dépendance au contexte.

2. La complexité de l'agroécologie

a) *Effets partiels des leviers agroécologiques*

Les leviers mis en œuvre par l'agroécologie ont en général un effet partiel comparé à l'effet observé lors de l'application de pesticides ou lors d'un apport d'engrais minéral dans le cadre de l'agriculture industrielle. En effet les produits chimiques sont malheureusement (c'est ce qui les rend si attractifs) redoutablement efficaces (du moins à court terme) alors que les processus écologiques ont des **effets plus diffus, décalés dans le temps ou incertains**.

(1) *Impacts sur la pratique agroécologique*

Du point de vue de la pratique agroécologique, cela signifie que pour obtenir un même niveau de résultat, il faudra **combiner plusieurs leviers**. Par exemple pour la protection des cultures, les alternatives aux pesticides ayant un effet partiel sur les bioagresseurs, il est nécessaire de combiner différentes méthodes de lutte afin d'obtenir un contrôle efficace des bioagresseurs, et n'utiliser les pesticides qu'en dernier recours : c'est la protection intégrée des cultures (FAO, 2013). Cette approche nécessite l'examen minutieux de toutes les techniques de lutte directe disponibles et la combinaison de mesures qui réduisent le développement de populations de bioagresseurs et encouragent les mécanismes naturels de contrôle biologique. Cela implique donc de mieux comprendre les mécanismes d'action des pratiques (cf. par exemple l'Encadré 2 sur l'effet des pratiques en interculture sur le piétin-échaudage du blé) et de prendre en compte les interactions entre pratiques. Par ailleurs, les agriculteurs sont généralement confrontés à plusieurs bioagresseurs simultanément et certaines méthodes peuvent avoir des effets antagonistes sur plusieurs

bioagresseurs (réduisant certains bioagresseurs mais augmentant d'autres), et, en raison des rotations, sur plusieurs cultures lorsque le cycle de vie du bioagresseurs s'étend avant ou après la saison de culture de l'hôte. En outre, comme les bioagresseurs et leurs ennemis naturels peuvent se disperser entre les champs ou accomplir une partie de leur cycle de vie en dehors de la culture, l'effet de la composition et de la configuration du paysage entourant le champ doit être pris en compte dans la conception de la protection intégrée.

Encadré 2 : Effet des pratiques en interculture sur la structure spatiale et le développement des épidémies d'une maladie d'origine tellurique

J'ai réalisé ma thèse sur le piétin-échaudage du blé. De façon très opportune (pour ma formation aux concepts de l'agroécologie), nous ne disposons pas de fongicide ni de gène de résistance efficace contre cette maladie. J'ai donc dès le début de ma formation été habituée à réfléchir en termes de combinaisons de leviers à effet partiel et donc d'interactions entre ces leviers.



Figure 3 : le piétin échaudage présente une structure en foyers de maladie (gauche et droite, les contrastes ont été accentués) dont la taille et la forme dépendent du type de travail du sol (photo centrale)

J'ai mené une première expérimentation sur les pratiques réalisées dans l'interculture (cultures intermédiaires de service à but assainissant et travail du sol). Les résultats obtenus (Gosme et al. 2007) nous ont conduits à remettre en cause l'idée généralement admise (basée sur l'observation des symptômes sur parties aériennes) que les foyers de piétin-échaudage se développent au cours d'une saison culturale par infection de plante à plante sur de courtes distances. La structure spatiale de la maladie (Figure 3) semblait plutôt liée à la structure spatiale de l'inoculum primaire qui était elle-même déterminée par la dispersion, lors des travaux du sol, des débris de culture infectés. L'augmentation de la taille des foyers de plantes échaudées parfois observée pourrait être due à l'augmentation (par intensification au sein des plantes malades) progressive du niveau de maladie au-delà du seuil d'expression des symptômes aériens. Ce travail a également montré que les pratiques culturales (ici, la gestion de l'interculture et le travail du sol) pouvaient influencer non seulement le niveau moyen mais aussi la structure spatiale d'une maladie d'origine tellurique, qui à son tour influence la vitesse des épidémies et la relation dégâts-dommages. La modification des pratiques culturales en interculture offre donc des pistes intéressantes dans une optique de protection intégrée des cultures

Par conséquent, la **complexité des décisions** des agriculteurs s'est accrue, passant de décisions tactiques telles que "dois-je traiter ce champ particulier contre un bioagresseur particulier avec un pesticide particulier" à des décisions stratégiques telles que "quelles méthodes (avec une efficacité partielle contre un ou plusieurs bioagresseurs et éventuellement un effet positif sur d'autres bioagresseurs) dois-je combiner pour protéger

cette culture et/ou la prochaine culture dans la rotation et/ou les cultures voisines ?". Il en va de même pour la fertilisation azotée. Les engrais chimiques ont un effet immédiat et on peut ajuster la dose en cours de culture en fonction de l'état de nutrition azotée de la culture (par comparaison visuelle avec une bande témoin surfertilisée, dosage de la teneur en azote de la plante ou estimation de la teneur en chlorophylle par transmittance ou réflectance). Au contraire, les méthodes "agroécologiques", comme l'utilisation d'engrais organiques ou l'insertion de légumineuses dans la rotation (en culture principale ou en culture de service), ont des effets à plus long terme.

Mais parfois on a de la chance, et une pratique visant un objectif partiel (par exemple réduire l'inoculum primaire) a également un effet positif sur un autre objectif (par exemple réduire la virulence des souches d'agent pathogène), comme mes résultats de postdoc semblent l'indiquer (Encadré 3).

Encadré 3 : l'allongement du délai de retour du blé : un moyen de faire d'une pierre deux coups pour lutter contre le piétin-échaudage ?

L'objectif de mon postdoc à l'Université de Cambridge était de paramétrer des modèles d'évolution des populations de l'agent causal du piétin-échaudage, qui présentent une structuration génétique en deux groupes. Cette structuration, observable avec différents outils (RFLP sur de l'ADN ribosomal mitochondrial de souches anglaises (Bateman *et al.*, 1997), RAPD et AFLP sur l'ADN nucléaire de souches françaises (Lebreton *et al.*, 2004)), existe à l'échelle mondiale et les deux groupes peuvent coexister au sein d'une même parcelle. La proportion de chaque groupe dans la population évolue avec l'âge de la monoculture de blé et cette évolution est associée à une variation de la sévérité de la maladie (Lebreton *et al.* 2007). De plus, des tests de pathogénicité sur un grand nombre de souches de chaque groupe indiquaient des différences d'agressivité entre les deux groupes. Il était donc légitime de se demander s'il serait possible d'influencer l'évolution des populations vers une prédominance des souches les moins agressives. Cela nécessitait de mieux caractériser les paramètres épidémiologiques de chaque groupe pour identifier les processus épidémiologiques régissant la compétition entre les deux groupes. J'ai donc mesuré différents paramètres épidémiologiques (taux de déclin lors de la phase saprophyte, paramètres décrivant la dynamique de la pathozone pour les infections primaires) sur cinq souches de chaque groupe, qui avaient été choisies de façon à couvrir l'ensemble du profil de variabilité génétique.

Les résultats (Gosme *et al.* 2013) indiquent une forte variabilité entre souches au sein même des groupes génétiques et aucune différence significative ni tendance claire n'ont pu être identifiées entre les deux groupes, probablement parce que la diversité intra-groupe (les souches avaient été sélectionnées pour couvrir l'ensemble du profil AFLP de la collection de souches Rennaises) masquait la diversité entre groupes sur un petit échantillon de 10 souches. Par contre, cette diversité a permis d'observer un trade-off (Figure 4) significatif entre deux paramètres épidémiologiques concernant deux phases différentes du cycle de vie de l'agent pathogène : l'efficacité d'infection (phase parasitaire) et la survie en l'absence d'hôte (phase saprophyte). Ainsi, les souches ayant la meilleure efficacité d'infection survivent moins longtemps dans le sol en l'absence de plante hôte (et inversement, les souches survivant le mieux ont une plus faible efficacité d'infection).

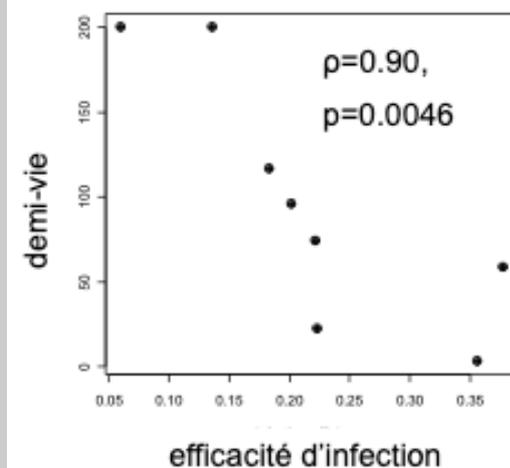


Figure 4 : trade-off entre l'efficacité d'infection et la survie en phase saprophyte

En termes pratiques, ce résultat indique le double effet bénéfique de l'allongement de la période de retour du blé : non seulement l'inoculum est réduit, mais les souches les moins agressives sont sélectionnées.

(2) Impacts sur la recherche en agroécologie

Du point de vue de la recherche, le fait que les leviers mis en œuvre par l'agroécologie ont un effet partiel implique que ces effets faibles sont plus difficiles à mesurer que les effets très marqués des leviers utilisés en agriculture industrielle. Il faut donc utiliser des méthodes statistiques particulières pour parvenir à détecter un signal dans des données très bruitées et avec de nombreux facteurs perturbants.

b) Dépendance au contexte

L'agriculture industrielle repose sur l'utilisation massive d'intrants pour s'affranchir des conditions du milieu et standardiser les situations de production (y compris en drainant les parcelles sujettes à l'hydromorphie). A contrario, l'agroécologie repose sur la mobilisation de ressources locales.

(1) Dépendance au contexte pédoclimatique

Pour la **recherche**, cela implique que les expérimentations en conditions contrôlées ont un intérêt limité (Dalgaard et al. 2003). Les expérimentations ont donc lieu en conditions naturelles, **au champ**, et sont de ce fait soumises aux conditions pédoclimatiques locales. Cela peut avoir un impact sur les résultats, avec pour corollaire que ces résultats sont difficilement généralisables, et sont même variables selon les années et donc difficilement publiables. L'Encadré 4 illustre une expérimentation où les conditions climatiques ont sans doute été la cause des résultats contradictoires sur l'impact de la structure spatiale du couvert de blé sur l'épidémie de piétin-échaudage.

Encadré 4 : Dépendance au contexte climatique de l'effet de la structure spatiale du couvert sur le développement d'une maladie tellurique



Figure 5 : Évaluation expérimentale d'un levier original pour lutter contre une maladie tellurique : la structure spatiale de la culture (A : semis en poquets, B : semis en ligne et C : semis à la volée)

J'ai mis en place une expérimentation au champ sur deux années pour tester l'effet de la répartition spatiale des plantes (lignes, volée, poquets, Figure 5) et de l'inoculum (agrégé, uniforme) sur le développement spatio-temporel du piétin-échaudage (Gosme and Lucas 2011). En 2005, l'effet significatif de la structure spatiale de l'hôte sur la sévérité et les incidences à l'échelle des plantes et des racines indique que, dans les conditions rencontrées cette année-là, l'agrégation de l'hôte augmente le niveau de maladie. Par contre, aucun effet de la structure spatiale de l'hôte n'a pu être démontré en 2006, peut-être du fait des conditions environnementales peu propices aux infections secondaires à travers le sol (faible pluviosité au printemps); or c'est à travers la modification du taux d'infection secondaire de plante à plante que devrait s'exprimer l'effet de la répartition des plantes (taux d'infection accru dans les poquets et diminué dans le semis à la volée, du fait de la plus grande proximité des plantes dans un cas, de la distance plus importante entre plantes dans l'autre).

En réalité, cette dépendance au contexte n'est pas spécifique de l'agroécologie, c'est pour cela qu'on répète les expérimentations. Cependant, les effets observables suite à l'application de pratiques agroécologiques ayant tendance à être plus faibles qu'en agriculture industrielle (cf. point précédent), les perturbations apportées par la variabilité pédoclimatique sont particulièrement gênantes pour dégager des résultats généralisables.

Dans certains cas, au contraire, les pratiques agroécologiques créent une **plus faible dépendance au contexte** (en particulier climatique). Cela pourrait être le cas de l'agroforesterie, qui permettrait ainsi de "tamponner" la variabilité des rendements due aux conditions climatiques, comme l'a montré une étude de simulation (Talbot 2011), et ce que nos résultats expérimentaux semblent confirmer (Figure 5).

Encadré 5 : Dépendance au contexte de l'effet de la compétition arbres-cultures

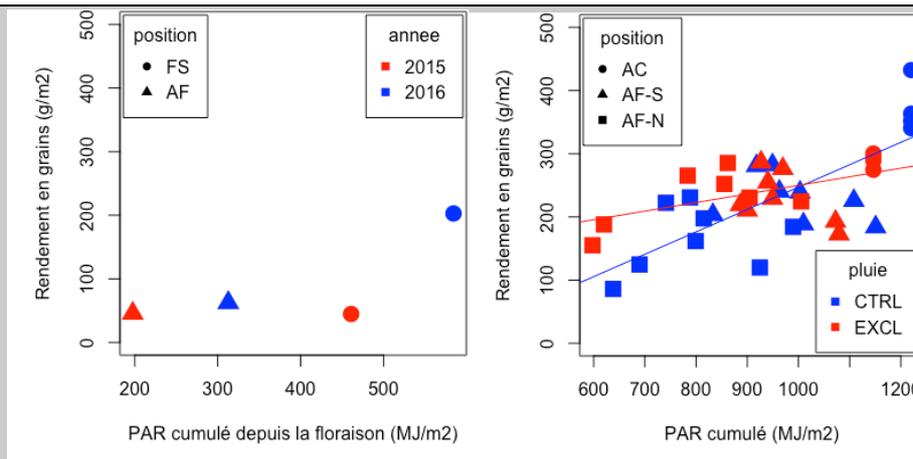


Figure 6 : La compétition domine les interactions arbres-cultures en conditions optimales (l'année 2016 pour la figure de gauche, la situation de contrôle sans exclusion de pluie pour la figure de droite), mais pas lorsque les conditions sont défavorables à la culture. FS et AC : full sun et agricultural control, AF : agroforesterie, AF-S et AF-N : au Sud et au Nord de l'arbre.

Une question centrale en agroforesterie est de quantifier la perte de rendement des cultures due aux compétitions pour la lumière, l'eau et les nutriments, qui n'est bien souvent pas compensée par les phénomènes de facilitation. On a beau être convaincu de la nécessaire multiperformance de l'agriculture, on finit donc toujours par tout simplement comparer le rendement en situation agroforestière avec la situation sans arbres. Dans nos expérimentations dans un système de noyers associés à des grandes cultures implanté sur le Domaine de Restinclières, nous avons ainsi observé à plusieurs reprises que les pertes de rendement sont très dépendantes des conditions, et en particulier du fait que les conditions sont proches de l'optimal dans la situation agriculture pure, ou au contraire que les conditions sont défavorables à la culture. Ainsi, dans une expérimentation sur le blé dur en 2015 et 2016, nous avons observé que le fait d'être cultivé sous les arbres ne diminuait pas le rendement en 2015 (en rouge sur la Figure 6), lorsque des inondations d'automnes avaient retardé le semis jusqu'en janvier (au lieu de novembre), alors qu'en 2016 (en bleu), année sans accident climatique majeur, la perte de rendement était de l'ordre de 70% (Inurreta-Aguirre et al. 2018). Le même phénomène a été observé en 2019 sur pois : en condition de contrainte hydrique forte (réalisée à l'aide de dispositifs d'interception de pluie), le rendement du pois est peu dépendant de la présence d'arbres et de leur taille (points rouges), alors qu'en conditions témoin normalement arrosé, le rendement décroît beaucoup plus lorsque la compétition pour la lumière augmente (Blanchet et al. 2020). L'analyse de données sur plusieurs années consécutives de rendement de vigne en agroforesterie vs témoin culture pure est également en cours, pour voir si l'effet millésime est atténué en agroforesterie.

(2) Dépendance au contexte paysager

Le contexte paysager joue également un rôle important dans l'efficacité des pratiques agroécologiques. C'est particulièrement vrai pour la **gestion des bioagresseurs**, une méta-analyse de Garratt et al. (2011) a montré que l'agriculture biologique tendait à augmenter les populations de ravageurs mais aussi d'ennemis naturels, et que l'importance de cet effet dépendait de l'échelle à laquelle les expérimentations étaient menées (parcelle ou exploitation). Les études montrent même que les interactions biotiques doivent être considérées à l'échelle du paysage (Médiène et al. 2011). Cet effet du contexte paysager est

tellement important qu'il faut parfois appliquer une pratique sur une surface suffisamment importante pour masquer l'effet du paysage. Par exemple il a fallu tester un mélange de variétés de riz résistante et sensible à la pyriculariose sur une surface de plus de 3000 ha pour démontrer l'efficacité des mélanges variétaux (Zhu et al. 2000). Un autre exemple est l'impact très important de la complexité du paysage sur l'efficacité des mesures agri-environnementales pour améliorer la biodiversité et les services éco-systémiques (Tscharntke et al. 2012) : dans un paysage d'agriculture intensive, le pool d'espèce régional est très faible et les habitats favorables mis en place ne sont pas colonisés. A l'autre extrême, dans un habitat très diversifié, la biodiversité est de toute façon très importante donc l'aménagement d'habitats favorables ne change rien (par exemple (Smits et al. 2012)). Finalement, seuls les paysages intermédiaires permettent aux pratiques agroécologiques d'exprimer leur effet.

Cependant cette description très sommaire qui oppose paysage complexe et paysage simplifié ne suffit pas, et il faut prendre en compte plus de **nuances dans la description des habitats**, en allant même jusqu'à la prise en compte des pratiques agricoles appliquées dans les parcelles voisines, voir même l'ensemble du paysage. Par exemple, l'Encadré 6 présente une étude sur l'effet de l'interactions entre les pratiques locales et les pratiques des parcelles voisines sur les populations de bioagresseurs du blé.

Encadré 6 : Interaction entre pratiques locales et du voisinage sur les dynamiques de bioagresseurs

La superficie cultivée en agriculture biologique (AB) est en augmentation dans de nombreux pays pour des raisons environnementales, politiques et économiques, mais on ne sait pas prédire l'effet de cette augmentation sur la dynamique d'évolution des populations des bioagresseurs (maladies, insectes ravageurs, mauvaises herbes). Cet effet dépendra à la fois de la capacité de multiplication des bioagresseurs dans les parcelles AB relativement aux parcelles conventionnelles, et de la dispersion de ces organismes entre parcelles. Pour l'instant, nous manquons de données sur ces deux aspects pour la majorité des bioagresseurs.



Figure 7 : Deux des 216 parcelles de blé ayant servi de support à l'étude sur les interactions entre pratiques locales et dans le voisinage : à gauche, parcelle en agriculture biologique, à droite, parcelle en agriculture conventionnelle

Les pucerons, les adventices et quatre maladies foliaires du blé (septoriose, oïdium, rouilles brune et jaune) ont été observés afin de comparer leur abondance dans un réseau de 216 parcelles agricoles, en AB et en conventionnel, entourées ou non de parcelles AB, et situées dans l'ouest des Yvelines (Gosme et al. 2012). Il y avait significativement plus de pucerons dans les parcelles conventionnelles que dans les parcelles en AB, et significativement plus

de pucerons dans les parcelles entourées uniquement de parcelles conventionnelles, comparées aux parcelles ayant au moins une voisine en AB, ce qui pourrait s'expliquer par une augmentation de la prédation/du parasitisme des pucerons dans les parcelles AB et aux alentours, du fait de l'absence d'insecticides et des ressources trophiques plus importantes fournies par les adventices. En effet, les parcelles AB contenaient significativement plus d'adventices (aussi bien en nombre qu'en diversité). L'environnement des parcelles interagit donc avec les pratiques locales pour déterminer le niveau d'infestation par les pucerons. Par contre aucun effet significatif de la présence de parcelles AB dans le voisinage n'a pu être démontré en ce qui concerne les adventices, et contrairement aux craintes émises par certains auteurs (par exemple (Adl et al. 2011)), l'agriculture biologique ne semble pas accroître le risque de multiplication d'inoculum de maladies ou de pucerons, en tout cas dans les conditions de l'étude, ni de dispersion de graines d'adventices vers les parcelles voisines.

(3) Comment bien caractériser ce contexte paysager ?

Mais en réalité, c'est même plus que les interactions entre parcelles qu'il faut prendre en compte, du fait des interactions complexes entre paysage, systèmes de cultures présents dans le territoire et pratiques locales (Chabert and Sarthou 2017). Mais alors qu'on sait que les variables du paysage influencent fortement la dissémination, la dynamique et l'évolution des bioagresseurs (Plantegenest et al. 2007), permettant en théorie une **gestion proactive des éléments paysagers** pour améliorer le contrôle des bioagresseurs dans les agroécosystèmes (Bianchi et al. 2006), cette pratique est encore **peu développée** du fait du **manque de description robuste de l'effet du paysage** sur la dynamique des populations de bioagresseurs. En réalité, de nombreuses études se sont penchées sur le sujet, mais il n'existe pas de consensus sur la démarche à adopter pour caractériser le paysage ni sur la pertinence des méthodes utilisées pour relier les variables paysagères aux données caractérisant les populations étudiées. Les études sur le sujet présentent une grande diversité à la fois en ce qui concerne l'étendue du paysage considéré (de 250 à 3000 m de rayon), les métriques paysagères utilisées pour caractériser la structure du paysage (rapport périmètre sur aire des parcelles, nombre de patches ou taille moyenne des parcelles, densité ou longueur de bordures, indices de connectivité prenant en compte la taille et la distances des patches "favorables" dans le paysage) ou sa composition (proportion d'habitats favorables ou diversité des habitats). De même la caractérisation de la composition du paysage est très variable (proportion d'un ou plusieurs habitats considérés comme plus ou moins favorables), de même que le niveau de détail utilisé pour décrire les habitats, des grands types d'occupation du sol du Corine Land Cover à une description fine du paysage incluant les pratiques agricoles (Annexe 2). Pour le traitement de données ponctuelles d'abondance, la technique d'utilisation de buffers de taille croissante autour d'un point d'observation est très largement utilisée dans ces études, mais le nombre de buffers, et surtout la façon dont l'autocorrélation des variables observées à différentes distances est prise en compte sont très variables d'une étude à l'autre (les auteurs réalisent en général une régression multiple, soit en incluant toutes les variables soit avec une étape de sélection stepwise des variables, ou une ACP sur les variables puis une régression sur les composantes de l'ACP). D'autres méthodes peuvent également être utilisées pour relier les variables paysagères aux abondances, diversité ou structure spatiale des populations : random forest, analyse canonique des redondances, inférences multi-modèles, Partial Least Squares, etc. Si les auteurs soulignent parfois le risque de dépendance des résultats au choix

des variables et des méthodes utilisées (Calcagno and de Mazancourt 2010), les méthodes ne sont jamais comparées entre elles et le choix des variables paysagères est rarement justifié (sauf par exemple dans (Batary et al. 2010)). Il est donc difficile de comparer les études entre elles et d'évaluer la robustesse des résultats. Forts de ce constat, un collègue et moi avons monté un réseau de collaborations entre chercheurs français travaillant sur les impacts du paysage sur les populations (y compris leur génétique) de bioagresseurs et/ou d'auxiliaires (Encadré 7).

Encadré 7 : Comment décrire le paysage et caractériser son effet sur les bioagresseurs et ennemis naturels ?

La description du paysage est l'un des éléments clefs des études visant à comprendre l'effet de la composition et de l'organisation du paysage sur les populations d'adventices, d'insectes et sur les maladies. Pourtant, il n'existe pas de consensus dans la littérature sur les variables à mesurer (proportions de différentes occupations du sol (lesquelles ?), forme des patches, indices de connectivité) ni sur les méthodes statistiques à utiliser pour analyser ces données particulières. Or le choix de la méthode statistique a un impact sur les résultats. L'objectif du projet COPACABANA (Gosme and Poggi 2016), qui réunissait 23 chercheurs de 11 unités différentes, était donc de mettre en commun un certain nombre de jeux de données (expérimentales ou simulées) à l'échelle paysagère afin de réaliser une comparaison de différentes méthodes d'analyse spatiale, y compris de nouvelles méthodes développées au cours du projet (Figure 8).

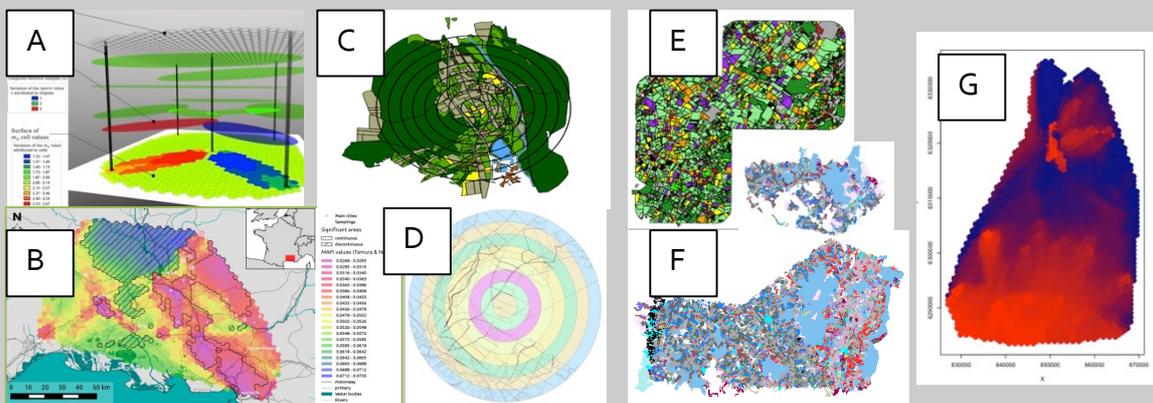


Figure 8 : A) méthode MAPI d'analyse génétique spatiale, B) résultats de la méthode MAPI, C) paysage utilisé pour les simulations de la dynamique spatiale d'un bioagresseur, D) buffers utilisés pour calculer la fonction d'influence spatiale (méthode SILand), E, F, et G) données spatiales (paysage + bioagresseurs) intégrées dans le package rcopacabana (Drouais, Dijon, haute vallée de la Durance).

Du point de vue méthodologique, la comparaison de neuf méthodes statistiques existantes a permis d'identifier les avantages et les limites de chacune (sensibilité aux corrélations des variables, aux données manquantes, possibilité ou non d'intégrer différents types de variables etc.) et de proposer une démarche permettant à tout chercheur de choisir la méthode (ou la chaîne de méthodes) la plus adaptée, en fonction de ses objectifs et des données dont il dispose. Deux nouvelles méthodes, MAPI et SILand, ont été développées

afin, d'une part, de prendre en compte la diversité génétique des parasites et, d'autre part, de mieux caractériser les effets des variables paysagères à différentes distances.

Du point de vue scientifique, ce travail de mise en commun et de ré-analyse des données acquises sur les effets du paysage sur différents bioagresseurs a permis de montrer que tous les bioagresseurs et auxiliaires ne réagissent pas de la même façon, ou pas aux mêmes échelles, aux différentes pratiques agricoles et de gestion du paysage, ce qui implique qu'il pourrait exister des antagonismes entre méthodes de lutte ciblant différents bioagresseurs de différentes cultures, ce qui complique la lutte agroécologique à l'échelle du paysage.

(4) Conséquence pour la conception

Pour la **pratique de l'agroécologie**, la dépendance au contexte signifie qu'il n'y a **pas de solution miracle** à attendre, ni même de package de solutions comme il peut y en avoir en agriculture industrielle (par exemple le package variétés élites + fertilisants qui ont fait succès de révolution verte). De ce fait, les systèmes de culture agroécologiques doivent être conçus localement, en prenant en compte les ressources locales (sol, biodiversité), les enjeux locaux et le contexte socio-économique local. Les **approches participatives** sont particulièrement adaptées à la conception de systèmes agroécologiques (Lacombe et al. 2018). En effet, ces approches, qui combinent les deux volets de l'agroécologie que sont la production de connaissances et l'utilisation de ces connaissances pour l'action, permettent de s'assurer que les leviers sont efficaces dans leur contexte d'utilisation, les agriculteurs apportant la connaissance du contexte local (Reynolds et al. 2014). L'enjeu de ces approches est donc de combiner les savoirs locaux, parfois empiriques, des agriculteurs et les connaissances plus détaillées mais plus génériques des chercheurs, dans l'objectif de réduire l'incertitude des agriculteurs et donc de favoriser l'adoption des pratiques agroécologiques (Lauri et al. 2016). Il faut aussi réussir à combiner les connaissances scientifiques issues de plusieurs disciplines (agronomie, économie, écologie, sciences sociales) (Altieri 1989). Cependant l'interdisciplinarité se heurte à différentes difficultés, non seulement l'existence d'un vocabulaire spécifique à chaque communauté scientifique, mais aussi des barrières institutionnelles et organisationnelles qui relèvent de la façon dont la recherche est évaluée et financée (Dalgaard et al. 2003). Pour surmonter ces difficultés, et parvenir à une approche transdisciplinaire, une collaboration étroite entre de multiples acteurs est nécessaire (Lauri 2017). Le travail de co-conception (associant des agriculteurs, des conseillers agricoles, d'autres acteurs du territoire et des chercheurs) prend souvent la forme **d'ateliers de co-conception**, qui permettent de construire une vision commune du problème, des objectifs et des moyens d'y parvenir. L'Encadré 8 présente un exemple d'outil utilisé pour animer ces ateliers de co-conception ciblant les agriculteurs en grandes cultures.

Encadré 8 : Mission Ecophyt'eau® : un outil de représentation et de conception collective de systèmes de culture ou de l'importance d'intégrer tous les acteurs dans un processus de conception

et la formation de deux jours indispensable pour avoir le droit de l'utiliser). Moralité : lors d'un travail participatif, il vaut mieux avoir les bons participants dès le début.

(5) Conséquence pour la sélection variétale

La recherche participative est également bien adaptée à la sélection variétale pour développer des variétés, voire des variétés populations, **adaptées au contexte de chaque agriculteur**. En effet il est maintenant bien démontré qu'il existe une forte interaction génotype x environnement x pratiques, et que la meilleure variété sélectionnée en station de recherche avec des conditions de culture optimales n'est pas forcément la meilleure variété à cultiver en conditions suboptimales (par exemple agriculture biologique ou agroforesterie). La sélection participative permet également de sélectionner des variétés qui sont adaptées aux critères de sélection des agriculteurs, des industriels (dans le cas de produits destinés à être transformés), et des consommateurs. Comme les variétés actuelles de toutes les espèces cultivées ont été sélectionnées pour l'agriculture conventionnelle (Wolfe et al. 2008), il est peut-être possible d'améliorer les performances de la culture en conditions agroforestières grâce à la sélection variétale. En outre, la diversité génétique améliore la résistance des cultures aux stress biotiques et abiotiques (Reiss and Drinkwater 2017), augmente la production de services écosystémiques (Hajjar et al. 2008) et permet, sous certaines conditions, aux populations de continuer à évoluer pour s'adapter à un contexte particulier (Phillips and Wolfe 2005). Il pourrait donc être intéressant de sélectionner pour l'agroforesterie des variétés populations qui présentent une forte variabilité génétique intra-variétale et pourraient donc être plus adaptées à l'agroforesterie. L'Encadré 9 présente un exemple de screening de variétés en conditions agroforestières pour identifier des variétés qui pourraient être prometteuses pour un futur programme de sélection variétale.

Encadré 9 Sélection participative de blé dur pour l'agroforesterie

En collaboration avec l'unité expérimentale de Diascope, j'ai participé à une expérimentation de screening de variétés de blé dur en termes d'adaptation à l'agroforesterie et de qualités agronomiques et technologiques. La définition de ces critères de qualité a été réalisée lors d'ateliers participatifs avec des industriels des pâtes, des oléiculteurs amenés à insérer le blé entre les oliviers, des nutritionnistes, d'où le terme de sélection participative (une partie des expérimentations a aussi été menée chez un agriculteur, mais des problèmes expérimentaux nous ont obligés à supprimer les résultats de cette parcelle de l'analyse). Le but de ce travail était d'évaluer la performance de plusieurs variétés de blé dur (lignées pures élites, populations et ressources génétiques) dans différentes conditions agroforestières ainsi qu'en plein soleil, afin de (i) tester l'hypothèse selon laquelle les variétés génétiquement diversifiées sont moins affectées par les conditions agroforestières que les lignées pures, (ii) caractériser les caractéristiques souhaitables de la culture pour les systèmes agroforestiers et (iii) identifier les variétés intéressantes à utiliser comme parents dans les futurs programmes de sélection végétale pour l'agroforesterie.

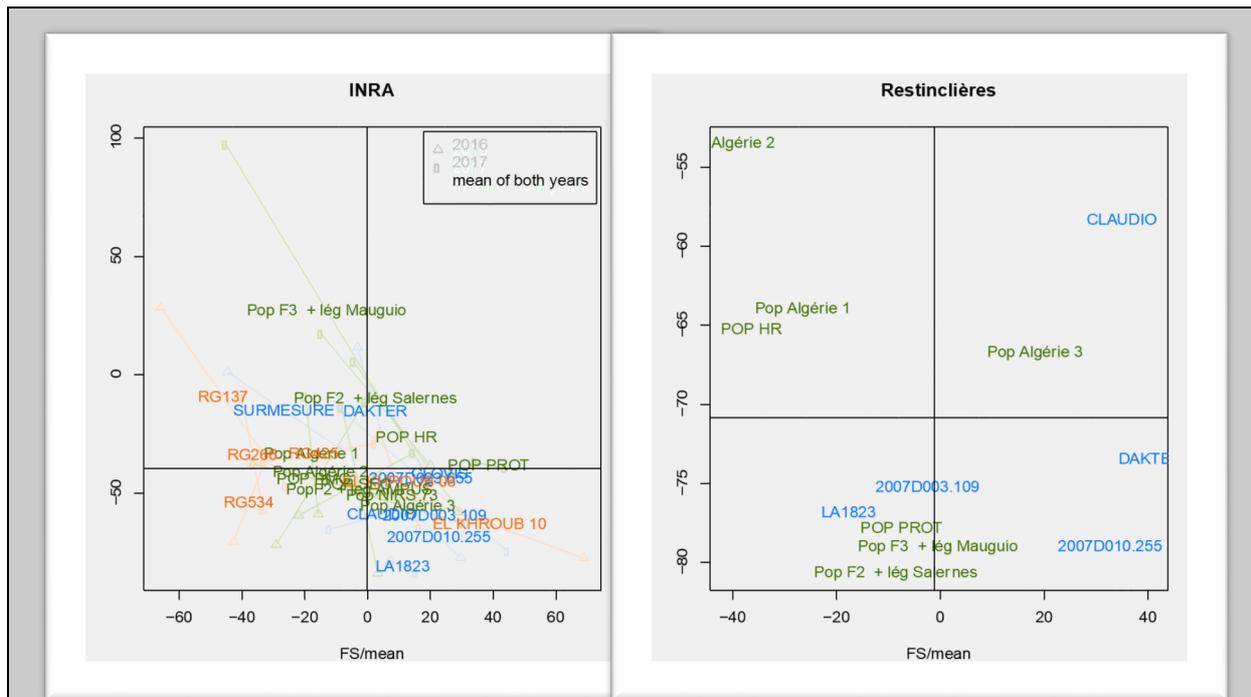


Figure 10 : Rendement normalisé en témoin culture pure et rendement relatif en agroforesterie des variétés populations (vert), lignées pures "élite"(bleu) et lignées pures de variétés anciennes (orange)

La Figure 10 indique que contrairement à notre hypothèse, les cultivars (populations) génétiquement diversifiés n'étaient pas mieux adaptés aux conditions agroforestières que les lignées pures : sauf à l'INRA en 2017, où les populations avaient un rendement relatif élevé, les populations n'ont pas eu un rendement significativement meilleur que les lignées pures et n'ont pas eu de composantes de rendement plus élevées. Par ailleurs aucune variété n'a donné de résultats systématiquement satisfaisant en agroforesterie dans tous les sites-années, nous n'avons donc pas pu sélectionner de candidats évidents pour un programme de sélection.

c) *Un exemple de pratique agroécologique : l'agroforesterie est-elle une voie d'adaptation de l'agriculture au changement climatique ?*

La caractéristique d'un système complexe tel qu'un agroécosystème est que son fonctionnement ne peut pas être prédit par simple observation de ses parties constitutives. On ne peut donc pas facilement prévoir l'efficacité de telle ou telle pratique à répondre à tel ou tel enjeu. Examinons un cas d'application : l'agroforesterie. Cette association d'arbres et de cultures ou d'élevage, est un exemple typique de diversification des systèmes agricoles prônée par l'agroécologie, dont on attend un grand nombre de bénéfices, d'une part grâce à la **complémentarité spatio-temporelle** pour l'utilisation des ressources entre espèces associées et d'autre part grâce à la **contribution de la biodiversité végétale** au fonctionnement écologique et aux **services des agrosystèmes**. Ainsi, des travaux ont montré l'augmentation de la productivité de l'ensemble du système, mesurée par le LER (Mead and Willey 1980), sur des systèmes à base d'arbres à bois en Europe (Graves et al. 2007), ou pour les vergers-maraichers (Paut et al. 2018), et une méta-analyse sur les impacts des différents modes de diversification à l'échelle mondiale a montré un effet positif de l'agroforesterie non seulement sur la biodiversité et sur la qualité des sols, mais aussi, lorsqu'elle est associée à une diversification des cultures, sur le rendement (Beillouin et al.

2019). Par ailleurs, les services écosystémiques produits par l'agroforesterie sont nombreux (Jose 2009), par exemple le stockage du carbone (Kay et al. 2019), les régulations biologiques (Boinot et al. 2019), l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Bai et al. 2016) ou la régulation du microclimat (Gomes et al. 2020). Ces deux derniers points sont particulièrement intéressants dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

(1) Effets positifs sur l'atténuation des extrêmes climatiques

En effet, le changement climatique global impacte directement la production agricole et forestière non seulement par l'augmentation de la température moyenne et du taux de CO₂, mais également par la modification de l'intensité et de la répartition saisonnière des pluies et par l'augmentation de la fréquence d'événements extrêmes (sécheresses, tempêtes, inondations, etc.). En milieu méditerranéen, les impacts prévus sont globalement négatifs pour les cultures comme pour les forêts, du fait principalement de l'augmentation du stress hydrique printanier et de l'échaudage estival. Pour les céréales, ce sont les fortes températures au moment de l'anthèse qui sont les plus néfastes (Zampieri et al. 2017), alors que pour les fruits, ce sont les coups de soleil ou "sunburn" (Racsko and Schrader 2012). Les arbres modifient le microclimat sous leur canopée du fait de **l'ombre** qu'ils portent pendant la journée, du **masque nocturne** qui diminue le refroidissement radiatif, de la transpiration des arbres et de la modification de la vitesse du vent (Peng et al. 2015). Les arbres d'ombrage sont souvent utilisés en milieu tropical pour protéger les cultures des excès de lumière et de chaleur, et l'agroforesterie est clairement identifiée comme un **moyen d'adaptation de l'agriculture au changement climatique** dans ces régions (van Noordwijk et al. 2014) en atténuant les variations de température de l'air et du sol (Lin 2007) et en réduisant l'évaporation du sol (Siriri et al. 2013). En milieu tempéré, l'agroforesterie est moins développée, mais elle attire de plus en plus l'attention en raison des divers services écosystémiques qu'elle peut fournir (Torralba et al. 2016). Il pourrait être intéressant de cultiver des céréales et des arbres fruitiers sous ombrage pour adapter l'agriculture au changement climatique en limitant les variations de température à la fois à l'échelle annuelle et à l'échelle journalière, réduisant ainsi la perte de rendement due aux températures extrêmes (gel, vague de chaleur), et en réduisant l'évaporation du sol par une diminution du rayonnement, de la vitesse du vent, de la température et une augmentation de l'humidité de l'air. En milieu tempéré, l'effet microclimatique de l'agroforesterie a été étudié principalement dans les systèmes agroforestiers traditionnels du Sud de l'Europe comme la dehesa (Sánchez et al. 2010), ou dans le cas des haies brise-vent (Nuberg 1998; Quinkenstein et al. 2009) mais, hormis l'étude de Peng et collaborateurs (2015) en Ontario, il n'existe pas d'étude du microclimat dans les systèmes agroforestiers "modernes" (alignements d'arbres dans des grandes cultures) avec des arbres adultes.

Le masque du ciel nocturne par les arbres **réduit le refroidissement radiatif** la nuit en réfléchissant le rayonnement infrarouge. Cet effet réduit le risque de dommages dus au gel (Scowcroft et al. 2000). Ceci est important pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique car des températures hivernales plus élevées accéléreront la phénologie des cultures (Zheng et al. 2016), ce qui pourrait rendre la plante plus sensible aux gels tardifs s'ils se produisent au moment où la culture est la plus vulnérable. Au printemps, pendant les nuits claires et froides, les cultures non protégées seront gravement endommagées par le gel, tandis que les cultures sous la canopée des arbres seront exposées à un risque moindre (cf. Encadré 10).

Pendant la journée, l'ombre des arbres évite que les parties sensibles de la culture soient exposées à la lumière directe du soleil et **réduit la température des organes** de la culture, ainsi que la température de l'air. Bien que l'ombre soit généralement préjudiciable au rendement des cultures en réduisant la photosynthèse, elle peut également protéger les cultures sensibles contre l'excès de rayonnement (par exemple "coups de soleil" sur les fruits), qui devrait augmenter avec le changement climatique (Webber et al. 2015). Par exemple, la production de pommes est très sensible à l'excès de chaleur et de lumière, qui provoque un stress photo-oxydatif dans les feuilles, entraînant une diminution des performances de l'arbre, ainsi que des coups de soleil sur les fruits eux-mêmes, les rendant invendables (jusqu'à 10 % des fruits, (Racsco and Schrader 2012)). La solution actuelle à ce problème consiste à utiliser des filets d'ombrage qui modifient à la fois la quantité et la qualité de la lumière incidente, avec des effets variables sur la qualité des pommes, selon le cultivar (Widmer 2001; Dayioglu and Hepaksoy 2016; Treder et al. 2016). Mais ces filets augmentent la température de l'air (jusqu'à +10°C mesurés par le CETA Hérault-Vidourle en 2019 !). Dans une perspective agroécologique, il faudrait remplacer ces protections artificielles par des arbres d'ombrage, d'autant que l'agroforesterie permettrait de bénéficier non seulement d'un effet protecteur, mais aussi des autres services écosystémiques.

Encadré 10 : Protection microclimatique des cultures en agroforesterie



Figure 11 : A gauche, dégâts dus aux gelées du 21-24 Avril 2017, à droite, les vignes près des pins parasol n'ont pas été touchées (Photos C. Dupraz).

Une vague de froid a frappé la région viticole du Languedoc-Roussillon les 19 et 20 avril 2017. Notre site expérimental n'a pas été trop touché (Figure 11), mais la proportion de plantes ayant subi des dommages dus au gel a été significativement plus importante dans la culture pure de vigne que sur la vigne cultivée sous les pins (7% des plantes au lieu de 2,2%, $p=0,0006$), et sous les sorbiers (1,3% des plantes au lieu de 0%, $p=0,016$). Ces observations ont été confirmées par des témoignages d'agriculteurs, par exemple Gaël Guibert (Mas Daumas-Gassac, l'un des plus célèbres domaines viticoles du Languedoc-Roussillon) a déclaré avoir perdu entre 50 et 100 % de la production de cette année-là dans les parcelles qui étaient en plein champ, alors qu'il n'y a eu aucun dommage visible dans les parcelles plus petites qui étaient entourées d'arbres.

Pour ce qui est de la protection contre la chaleur, nous avons observé une légère réduction de la température de l'air dans la zone des grappes en agroforesterie par rapport au témoin viticole (maximales journalières réduites de 1 à 3 °C selon les endroits de la parcelle). Malheureusement pour nos études (mais heureusement pour le viticulteur), la canicule de Juin 2019 n'a pas touché la parcelle, et nous n'avons donc pas pu voir si les arbres ont un effet protecteur, ce qui n'est pas certain. En effet la réduction de température à l'ombre des

arbres ne suffit pas : un sol bien pourvu en eau est également nécessaire car cela favorise la transpiration par les plantes, qui participe à leur refroidissement. Or il ne faut pas oublier que les arbres, même s'ils ont un effet bénéfique sur le microclimat, sont en compétition avec la vigne pour les ressources du sol (en particulier l'eau et l'azote) et pour la lumière.

(2) Effets négatifs sur la disponibilité des ressources

Mais évidemment, cet effet positif s'accompagne aussi d'effets négatifs (**compétitions pour l'eau, la lumière l'azote** entre les différentes espèces). Dans les systèmes agroforestiers tempérés, la complémentarité des arbres à feuilles caduques et des céréales d'hiver pour l'utilisation des ressources a été très bien mise en évidence (Dupraz and Liagre 2011; Dufour et al. 2013). En été, après la récolte de la culture, la lumière profite à la croissance des arbres tandis qu'en hiver, les arbres ayant perdu leurs feuilles, la lumière est captée par la culture d'hiver, de même qu'au cours de toute l'année dans les systèmes agroforestiers jeunes, les petits arbres captant très peu de rayonnement. Cependant, la complémentarité n'est que partielle et pendant une partie de l'année, les arbres et les cultures sont en compétition pour les ressources. Pour les cultures d'été (y compris la vigne), il n'y a pas de complémentarité temporelle pour l'utilisation des ressources, on peut donc s'attendre à des pertes de rendement plus importantes. L'Encadré 11 par exemple montre l'impact de la compétition arbres-culture dans le cas de la vigne.

Encadré 11 : Compétitions arbres-vigne

Afin de quantifier les effets de l'agroforesterie sur le comportement de la vigne, j'ai suivi le rendement et la vigueur végétative, ainsi que la phénologie, des indicateurs de stress hydrique et la composition des raisins, en agroforesterie (AF, association dès la plantation en 1996 avec des pins parasol) et en témoin viticulture pure (TV) trois années de suite (pas d'analyse de baies la première année) sur le domaine de Restinclières (Hérault).

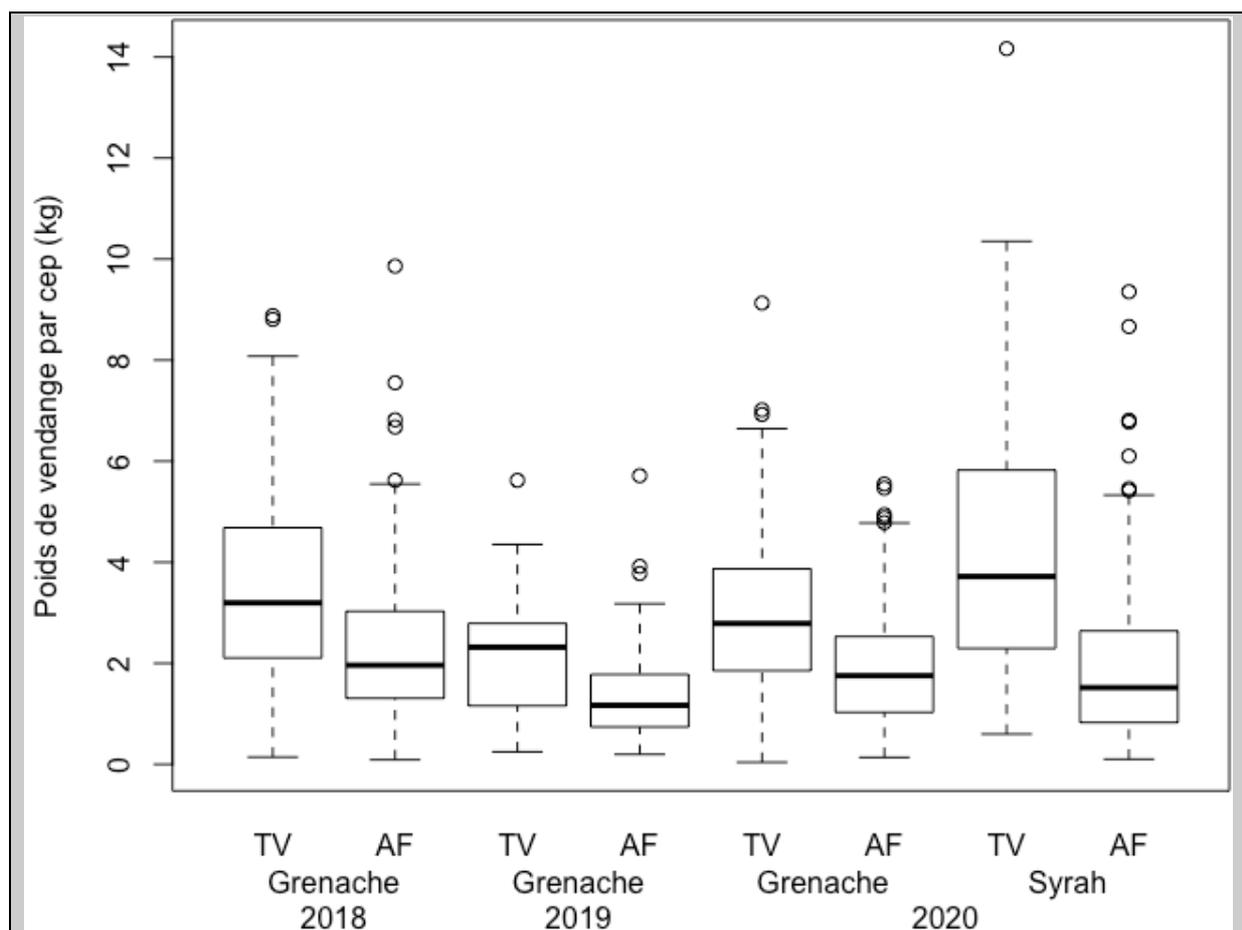


Figure 12 : Poids de vendange par cep en fonction de l'année, du cépage et du système de culture (AF : agroforesterie, TV : témoin viticulture pure).

Les résultats montrent une perte importante de rendement par cep en agroforesterie par rapport au témoin viticole, sur Grenache (en moyenne -34% en 2018, - 36,7% en 2019, - 33,8% en 2020), mais surtout sur Syrah (-55,3 % en 2020). Bien que la mortalité des ceps soit légèrement inférieure en agroforesterie (taux de survie de 77,4% en AF contre 74,6% en TV pour Grenache, taux de survie de 46,3% contre 44,6% pour Syrah), cet effet positif est très loin de compenser les pertes de rendement, d'autant qu'en agroforesterie, on perd également des ceps du fait de la rangée d'arbres, qui remplace un à deux (selon les parcelles) rangs sur 6. Les rendements à l'hectare (en prenant en compte l'emprise de la rangée d'arbres) sont donc :

Tableau 1 : Rendement en tonnes par hectare (prenant en compte la surface prise par les arbres) en vigne agroforestière (2 modalités de distance arbres-vigne) et en témoin viticole.

Année	Cépage	Extensif	Intensif	TV
2018	Grenache	4.6	6.6	10.5
2019	Grenache	2.9	n.a.	6.4
2020	Grenache	3.5	5.7	9
2020	Syrah	2.1	3.2	7.7

On peut donc en conclure que l'association vigne-pin parasol de plus de vingt ans avec une forte densité d'arbres n'est pas bénéfique. En effet, même si les arbres peuvent apporter une protection climatique à la vigne (cf. Encadré 10), il faudrait, pour justifier l'implantation d'agroforesterie extensive uniquement sur des critères de productivité, que

cette protection "sauve" systématiquement le rendement lors d'événements extrêmes dévastateurs pour la vigne pure qui surviendraient tous les 1,7 ans en moyenne. Cela a très peu de chance d'arriver, d'une part parce que même dans le cas du changement climatique, la probabilité d'avoir une perte totale de rendement en témoin viticole plus d'un an sur deux est faible, et d'autre part, si un tel bouleversement climatique catastrophique arrivait, les chances pour que les arbres parviennent à sauver la récolte à tous les coups seraient faibles. Bien entendu, il existe d'autres justifications pour implanter des arbres (production fruitière, aspects paysagers, impacts sur la biodiversité ou l'érosion, etc.), et surtout d'autres essences sans doute plus adaptées à l'association que le pin parasol qui, comme son nom l'indique... fait beaucoup d'ombre !

Il est donc difficile de prévoir la balance entre les effets positifs et négatifs de l'agroforesterie du fait des nombreuses interactions à l'œuvre. D'autant que les expérimentations sur ce sujet ne sont pas faciles à réaliser, principalement en raison des échelles spatiales et temporelles impliquées dans l'étude des systèmes agroforestiers. Les sites de cultures en allées avec des **arbres assez vieux** pour avoir un impact significatif sur les cultures **sont très rares** : 30 % de toutes les publications faisant état d'expériences de cultures en allées tempérées au cours des trois dernières décennies provenaient de trois sites seulement (Wolz and DeLucia 2018) : Station de recherche en agroforesterie de Guelph (Guelph, Canada ; planté en 1988), Centre de recherche Greenley Memorial de l'université du Missouri (Novelty, MO, USA ; planté en 1997), et Domaine de Restinclières (Montpellier, France ; planté en 1995).

3. La modélisation permet-elle de gérer cette complexité ?

Heureusement, la science a justement pour objectif de **comprendre les phénomènes complexes**, et la recherche a développé des outils pour gérer cette complexité. L'un de ces outils est la modélisation. Le modèle est construit pour donner une représentation intelligible et partageable d'un système qui nous intéresse pour mieux le comprendre et l'expliquer. Il existe plusieurs types de modèles : modèles analogiques (par exemple une maquette), modèles conceptuels (par exemple un schéma de fonctionnement), modèles mathématiques (par exemple système d'équations différentielles couplées). Parmi les modèles mathématiques, on peut encore distinguer les modèles mécanistes, où le fonctionnement du système est représenté à l'aide d'équations décrivant les processus sous-jacents, et les modèles empiriques, qui fonctionnent comme des boîtes noires et sont juste utilisés pour faire de la prédiction sans chercher à comprendre les processus qui causent les sorties du modèle. Je ne parlerai ici que des modèles mathématiques (mais j'aborderai un exemple de modèle analogique dans la partie projet) et mécanistes.

a) La modélisation pour favoriser l'interdisciplinarité

L'une des principales difficultés de l'interdisciplinarité est l'existence d'un vocabulaire spécifique à chaque discipline (le jargon), qui complique le dialogue entre spécialistes de chaque discipline. Un modèle, en particulier un modèle mathématique, permet de lever cette barrière : les mathématiques sont un langage universel. Par ailleurs, on peut **coupler des modèles issus de différentes disciplines** pour accéder à de nouvelles dimensions dans la prédiction. Ce couplage peut être soit fort, lorsque deux modèles échangent des informations dans les deux sens, permettant des boucles de rétroaction de chacun des modèles sur l'autre, soit faible, lorsque les sorties d'un modèle sont utilisées comme entrées

d'un autre modèle. C'était le cas des travaux que je présente dans l'Encadré 12, qui enchaînaient des travaux de biologie, d'épidémiologie et d'écologie évolutive pour proposer des méthodes pour favoriser l'invasion et la persistance des souches les moins agressives de pathogènes d'origine tellurique.

Encadré 12 : Une démarche pour intégrer la biologie des champignons, l'épidémiologie végétale et l'évolution des populations pour le contrôle durable des maladies d'origine tellurique

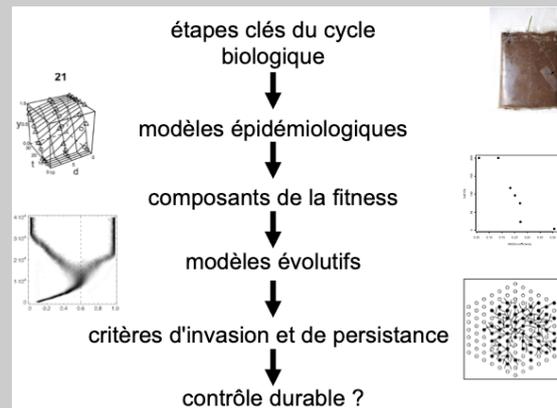


Figure 13 : Démarche adoptée pour proposer de nouvelles méthodes de lutte contre les maladies d'origine tellurique.

Mon postdoc consistait à appliquer les 3 premières étapes de cette démarche dans le cas du piétin-échaudage du blé. J'ai travaillé avec un mathématicien pour l'intégration mathématique du modèle épidémiologique, mes résultats ont ensuite servi à des évolutionnistes qui ont étudié, à l'aide de modèles d'évolution des populations, les conséquences évolutives (spéciation, coexistence entre souches), pour en déduire des critères d'invasion et de persistance. L'objectif final était de favoriser l'invasion et la persistance des souches les moins agressives. Il se trouve que les résultats ont montré qu'aucun des modèles théoriques testés ne réussissait à expliquer l'existence des deux souches de Ggt observées dans les populations naturelles (van den Berg et al. 2010), par contre, l'existence d'un trade-off entre efficacité d'infection et survie (Figure 4) permet bien de sélectionner les souches les moins agressives (van den Berg et al. 2011).

b) *La modélisation pour rendre appréhendable la complexité*

L'importance pour l'agroécologie de la **hiérarchie des différents niveaux d'organisation** du vivant a été soulignée (Dalgaard et al. 2003). Or l'un des principaux défis de la modélisation en biologie est l'élaboration d'approches permettant de traiter et de mettre en relation des phénomènes à des échelles disparates d'espace, de temps et de complexité organisationnelle (Levin 1992). La théorie de la hiérarchie fournit un cadre théorique qui permet de traiter ce problème. Wu et David (2002) ont défini une approche hiérarchique comme une manière de décomposer la complexité et un processus de mise en évidence de l'ordre sous-jacent. Correctement définis, les niveaux hiérarchiques permettent de délimiter les holons (c'est-à-dire les éléments du système). Un holon est à la fois un ensemble atomique, lorsqu'il est vu à un niveau donné de la hiérarchie, et un composé, lorsqu'il est vu à un niveau inférieur de la hiérarchie (c'est-à-dire à une résolution spatiale et/ou temporelle

plus élevée) (Koestler 1967). À chaque niveau, les holons sont définis de telle manière que les interactions entre leurs composants soient sensiblement plus fréquentes à l'intérieur qu'entre les holons. Cette théorie fournit un cadre très puissant pour appréhender la complexité des agrosystèmes. En effet, les systèmes hiérarchiques ont des **propriétés communes, indépendantes de leurs contenus** spécifiques (Simon 1962).

Une approche réductionniste se contenterait d'étudier les phénomènes au sein d'un holon unique. Le défi de l'agroécologie dans cette approche hiérarchique est au contraire de comprendre comment des processus agissant à différents niveaux de la hiérarchie interagissent entre eux. Là encore, la modélisation peut s'avérer utile.

En ne considérant que 2 niveaux, on retrouve le cadre théorique des métapopulations (Gilligan, 2002). Cette théorie permet de prédire la probabilité de colonisation et d'extinction de la maladie dans des sous-populations individuelles (par exemple les champs) et à l'échelle du paysage en fonction du paramètre de transmission de la maladie (au sein des sous-populations et entre elles), des taux de remplacement ou d'élimination des hôtes et du nombre et de la taille des sous-populations (Park et al., 2001). Cette théorie a été testée dans des habitats naturels ou semi-naturels, avec des patchs de plantes sauvages comme sous-populations (Burdon et al., 1995; Ericson et al., 1999) mais ses applications dans des systèmes agricoles, avec des champs comme sous-populations est rare (Gilligan, 2008). L'étape suivante est de considérer non plus seulement deux niveaux mais toute une échelle de niveaux emboîtés les uns dans les autres.

L'Encadré 13 présente un exemple de l'utilisation de cette théorie pour développer un **modèle générique**, applicable aussi bien à une hiérarchie plante>racine>site en épidémiologie végétale qu'à une hiérarchie région>troupeau>animal en épidémiologie animale (voire ville>école>classe en épidémiologie humaine). Bien sûr, cela ne s'applique qu'aux cas où la structuration en niveaux existe clairement : si par exemple les plantes interagissent autant avec les plantes des champs voisins qu'avec les autres plantes du même champ, on ne pourra pas considérer l'échelle "champs" comme un niveau pertinent.

Encadré 13 : Application de la théorie de la hiérarchie pour mieux comprendre la dispersion des épidémies végétales

Figure 14 : Représentation schématique du fonctionnement du modèle Cascade (Gosme and Lucas, 2009a, 2009b) et exemple de hiérarchie de niveaux d'organisations pour son application en épidémiologie végétale.

Un paysage peut être vu comme un ensemble de champs au sein desquels les éléments, ici des poquets (c'est-à-dire des groupes de plantes), interagissent plus entre eux qu'entre poquets de champs différents, et les plantes d'un même poquet interagissent plus entre elles qu'entre plantes de poquets différents, une plante contient plusieurs racines, et une racine est constituée de plusieurs sites d'infection (Figure 14). J'ai créé un modèle épidémiologique qui prend en compte cette structuration de l'hôte sous forme d'échelles spatiales emboîtées afin de répondre aux questions suivantes: Comment la structure spatiale de l'hôte (architecture et localisation), ainsi que la localisation de l'inoculum influencent-elles la dynamique spatiale et temporelle des épidémies? Quelle(s) combinaison(s) de ces éléments minimise le risque de maladie?

Le modèle est un modèle individu-centré, les individus étant les éléments à chaque niveau. Ils se regroupent sous la forme d'un arbre pour représenter la nature hiérarchique du système. Chaque individu est soit sain, soit infecté. Et au sein d'un groupe, les individus s'infectent entre eux en fonction d'une équation d'infection où le terme de contact dépend de leur organisation spatiale, c'est-à-dire du fait que la maladie se propage soit de façon homogène, soit en foyers en deux dimensions, soit en ligne... Avec autant de niveaux qu'on veut et autant d'individus par niveaux qu'on veut. Dans la théorie de la hiérarchie, ce qui justifie l'existence de niveaux différents, c'est que les interactions entre éléments d'une même entité sont beaucoup plus importantes qu'entre éléments de deux entités différentes. Dans mon modèle, j'ai fait l'hypothèse de l'étanchéité entre les entités: l'infection entre individus de différents holons n'est pas possible directement, mais résulte de l'infection entre individus à l'échelle supérieure. Les sorties du modèle sont de 2 types:

- les proportions d'individus malades aux différents niveaux, ce qui permet d'une part de représenter la dynamique temporelle des épidémies et d'autre part de réaliser des courbes d'incidence à deux niveaux successifs, ce qui permet de caractériser le niveau d'agrégation. Ainsi, le modèle permet de tester des hypothèses concernant le fonctionnement des épidémies et les liens entre incidences à différentes échelles, et en particulier l'effet de la structure spatiale du peuplement hôte et de l'inoculum primaire sur la dynamique et l'agrégation de la maladie (Gosme and Lucas 2009a).
- La variance du nombre d'individus malades par groupe à chaque niveau, ce qui permet de la comparer à la variance théorique sous l'hypothèse d'une loi binomiale et ainsi d'analyser le niveau d'agrégation par une analyse power-law modifiée (Hughes and Madden 1992), une méthode statistique utilisée en phytopathologie pour analyser l'agrégation des maladies mesurées sous forme d'incidence (proportion de plantes ou d'organes malades).

On retrouve donc des méthodes classiques de description de la dynamique spatio-temporelles des épidémies, ce qui permet de tester le modèle à l'aide de données de la littérature. Cela nous a permis de mettre en évidence de nouvelles propriétés de l'analyse power-law modifiée (Gosme and Lucas 2009b). Ce travail a inspiré d'autres chercheurs spécialistes de l'analyse spatiale et a motivé la rédaction d'une "letter to the editor" de la revue *Phytopathology*, dans laquelle les auteurs écrivent, à propos de mes résultats, "The results are genuinely interesting and may have important theoretical and practical implications" (Turechek et al. 2011).

Du point de vue de la pratique, le modèle montre l'intérêt de maintenir l'inoculum initial agrégé pour réduire les épidémies. Dans la plupart des cas, les épidémies étaient plus lentes dans le cas de grands agrégats d'hôtes que dans celui de petits agrégats, sauf dans le cas

d'une combinaison d'inoculum agrégé et de dispersion uniforme de la maladie. La stratégie optimale de lutte contre la maladie dépend donc de plusieurs facteurs, dont les conditions initiales.

c) *La modélisation pour prédire la résultante d'interactions multiples*

La modélisation mathématique, qu'elle soit mécaniste ou empirique, permet de prédire les effets d'interactions multiples, qui ne sont pas triviales et dont la résultante n'est donc pas prévisible par un simple raisonnement à partir d'un modèle conceptuel. Elle permet ainsi **d'extrapoler les résultats** par rapport aux situations testées expérimentalement, soit pour tester des combinaisons de pratiques qui n'ont pas pu être testées, soit pour extrapoler à d'autres conditions pédoclimatiques, soit les deux.

(1) "Prédictions" a posteriori pour vérifier la cohérence d'hypothèse explicatives

Une première application des modèles mécanistes est leur utilisation pour vérifier que les hypothèses émises pour interpréter les résultats expérimentaux sont **suffisantes pour rendre compte des phénomènes observés**. Ce n'est bien sûr pas une preuve que l'explication avancée est la bonne, car il y a plusieurs façons possibles d'arriver au même résultat, mais la capacité d'un modèle à correctement prédire une situation observée constitue un faisceau d'indices qui donne une certaine assurance dans l'interprétation des observations. Meine van Noordwijk a l'habitude de commencer chaque formation à la modélisation par une petite comptine, qui illustre cela, dans son deuxième paragraphe :

*"Don't believe, Don't believe,
Don't believe the models you will see,
Unless the data agree*

*Don't believe, Don't believe,
Don't believe your data again,
Unless your models explain*

*However, suspicion will be on you,
If agreement is too good, to be true"*

Au contraire, si le modèle s'avère incapable de reproduire les données observées, c'est une démonstration par l'absurde que les **processus inclus dans le modèle ne sont pas suffisants** et que d'autres explications doivent être recherchées. Avant la tentative infructueuse d'expliquer la structure génétique des populations de *Gaeumannomyces graminis var tritici* par des différences de niche, de sensibilité à la flore antagoniste ou de sélection divergente pendant différentes phases épidémiologiques (cf. Encadré 12), j'avais, pendant ma thèse, développé un modèle pour valider les interprétations des expérimentations présentées dans l'Encadré 2 et l'Encadré 5. Cette tentative est présentée dans l'Encadré 14.

Encadré 14 : Un modèle spatialement explicite pour tester les effets combinés du type de semis et du type de travail du sol

Lorsque j'ai réalisé ma thèse, le terme d'agroécologie n'était pas encore très répandu, on parlait plutôt d'agriculture durable (Meynard et al. 2006), et dans le cas particulier de la réduction de la dépendance aux pesticides, de protection intégrée des cultures. Mais les objectifs, les méthodes et les moyens de la protection intégrée s'intègrent bien dans l'agroécologie : réduction des intrants, utilisation de connaissances biologiques et écologiques pour contrôler les bioagresseurs en combinant des pratiques à effets partiels, et bien sûr place prépondérante des régulations biologiques. Mon manuscrit de thèse se terminait d'ailleurs par les phrases suivantes : « Cette réduction [de l'utilisation des pesticides] va nécessiter la mise en œuvre de stratégies de gestion innovantes, intégrant les différents éléments de la biologie et de l'écologie des bioagresseurs. Nous espérons que les modèles développés dans cette thèse nous permettront de nous inscrire dans cette démarche. ».

J'ai par exemple développé un modèle spatialement explicite permettant de prédire l'effet combiné de la structure spatiale de l'hôte (dépendant du type de semis) et de l'inoculum (dépendant du type de travail du sol). Les simulations montrent que l'agrégation de l'inoculum réduit la vitesse de développement de la maladie et, dans le cas du semis en poquets, le niveau final de maladie, et que l'agrégation de l'hôte accélère le développement de la maladie en début d'épidémie, mais le ralentit ensuite (Figure 15).

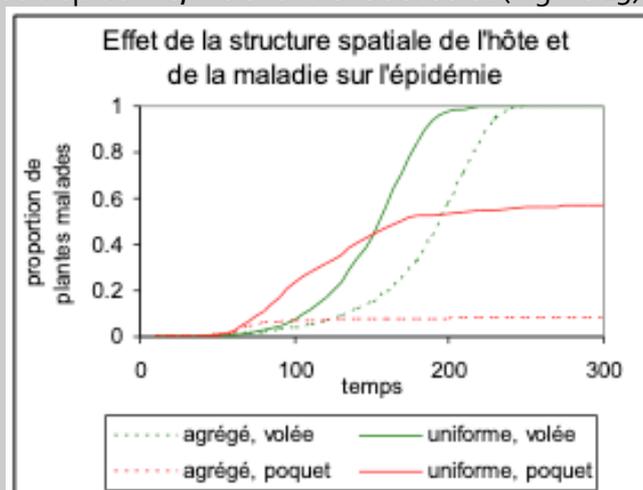


Figure 15 : Un exemple de simulations très contrastées : structure de l'hôte aléatoire (semis à la volée) ou agrégée (semis en poquets) en interaction avec la structure spatiale de l'inoculum (qui pourrait dépendre du travail du sol pendant l'interculture, comme montré dans l'Encadré 2, bien que les modalités testées ici soient plus contrastées).

Bien que les tendances mises en évidence dans le modèle correspondent aux tendances observées au champ, les résultats restent quantitativement très différents. Ce qui prouve que le modèle ne capture pas tous les processus pertinents. En effet, des expérimentations indépendantes ont montré que les processus sur lesquels le modèle avait été construit (infections de plante à plante au cours d'une saison) étaient finalement secondaires dans l'épidémiologie de la maladie (cf. Encadré 2).

(2) Evaluation ex ante

Les modèles de culture sont des outils puissants pour prédire le rendement et les impacts environnementaux de différents systèmes de culture dans une large gamme de conditions pédoclimatiques, permettant de réaliser une **évaluation multicritère ex ante de systèmes de culture innovants** sans avoir à mener des expériences de terrain longues et coûteuses.

Par exemple, le modèle de culture STICS (Brisson et al. 1998) simule les cycles de l'eau, du carbone et de l'azote à un pas quotidien à l'échelle du système de culture. Sa robustesse et sa précision ont été largement évaluées dans une série de conditions pédoclimatiques (Coucheny et al. 2015), y compris dans la région méditerranéenne (Plaza-Bonilla et al. 2017, 2018). Sa dernière version permet de simuler des mélanges bispécifiques, par exemple céréales-légumineuses (Vezy et al. 2020). Les modèles de cultures permettant de prédire les interactions entre différentes pratiques, et avec l'environnement (sol, climat), ils peuvent être utilisés pour concevoir/évaluer des systèmes de culture optimisant un ou plusieurs critères d'évaluation (Demestihis et al. 2018). Les modèles de cultures qui intègrent des paramètres variétaux (ce qui est le cas de STICS) peuvent également servir à prédire les performances de nouveaux génotypes dans des conditions autres que celles dans lesquelles ils ont été initialement testés, que ce soit en termes de conditions pédoclimatiques ou d'itinéraire techniques, permettant ainsi d'étudier les interactions génotype-environnement conduite (Jeuffroy et al. 2014).

(3) Prédiction de situations non testables expérimentalement : temps long

Le modèle STICS est à la base du modèle d'agroforesterie Hi-sAFé (Dupraz et al. 2019), qui simule en trois dimensions les compétitions entre les arbres et les cultures pour la lumière, l'eau et l'azote. Il est particulièrement utile pour prédire les effets de différents contextes pédoclimatiques sur les **interactions arbres-cultures**, pour étudier la balance entre les effets positifs (microclimat sous les arbres) et négatifs (compétitions) de l'agroforesterie **dans différentes conditions**. Cela diminue le besoin d'expérimentations au champ, qui sont particulièrement longues et gourmandes en terrain dans le cas de l'agroforesterie (Stamps and Linit 1998). On peut également l'utiliser pour tester l'effet de situations qui n'existent pas encore, comme les projections climatiques pour les 50 prochaines années. L'Encadré 15 présente un exemple d'utilisation de ce modèle pour étudier l'effet de l'agroforesterie sur les stress hydriques, thermiques et azotés (et leurs impacts sur le rendement) en climat passé, actuel et futur. Ce modèle a par ailleurs déjà été utilisé pour étudier la compétition pour la lumière en fonction du design de la parcelle (distance et orientation de lignes d'arbres) et de la latitude (Dupraz et al. 2018), et des études sont en cours pour étudier l'effet de l'agroforesterie sur le bilan hydrique de parcelles sous différents climats et différents types de sol.

Encadré 15 : Simulation de l'effet des interactions arbres-cultures sur le rendement du blé sous différents scénarios climatiques

Même si globalement les effets attendus du changement climatique sur les cultures sont négatifs, en particulier aux latitudes faibles et moyennes (Rosenzweig et al. 2014), il y a des mécanismes complexes d'interaction entre les décalages phénologiques et les périodes de sensibilité des cultures aux excès ou au manque de température. Par exemple, à température moyenne de 22,3°C, certaines saisons de croissance peuvent connaître des températures plus chaudes au début de la période de croissance qui avancent les dates d'anthèse, mais des températures plus fraîches pendant le remplissage des grains qui retardent les dates de maturité, ce qui entraîne des rendements plus élevés (et vice-versa si le pattern de variation thermique est inversé) (Asseng et al. 2015). Dans le cas de l'agroforesterie, la situation est encore plus complexe : la présence des arbres modifie le microclimat de façon différente le jour et la nuit, entraîne des décalages phénologiques

supplémentaires, et son effet n'est pas identique chaque année du fait de la réaction de l'arbre lui-même aux conditions climatiques (en plus bien entendu de sa croissance d'année en année). L'objectif d'un des post-doctorants pour qui j'ai participé à l'encadrement était justement d'étudier ces interactions complexes entre changement climatique, microclimat, stress hydriques et thermiques des cultures et finalement rendement des cultures et de l'association, à l'aide du modèle de simulation Hi-sAFe.

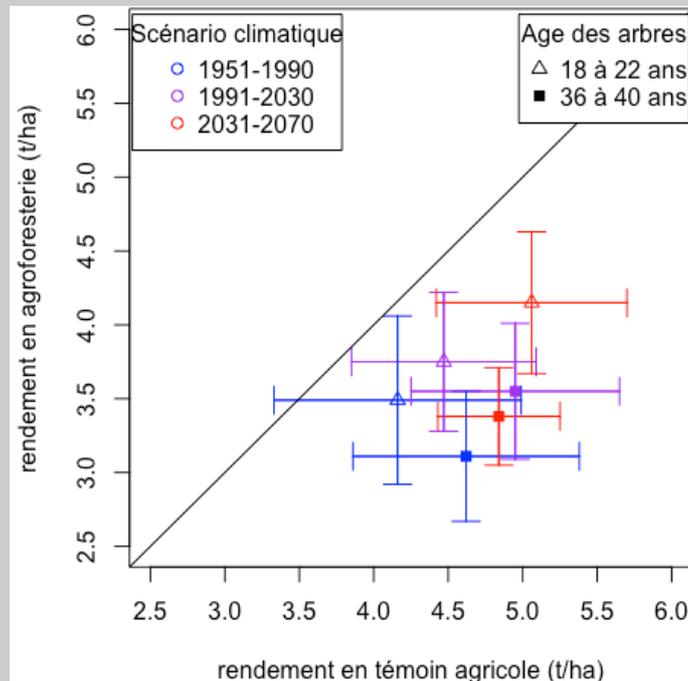


Figure 16 : Simulations du rendement et sa variabilité (écart-type) en agroforesterie vs témoin agricole, pour trois scénarios climatiques et deux catégories d'âge des arbres

Les résultats montrent que l'agroforesterie atténue fortement les stress dus aux extrêmes de températures (à la fois chauds et froids). Le rendement des cultures dans le système agroforestier diminue avec l'âge des arbres, mais devient plus stable (réduction de l'écart-type interannuel) par rapport au témoin agricole, et ce quelle que soit la période simulée (Figure 16).

(4) Prédiction de situations non testables expérimentalement : larges échelles spatiales

Des outils d'aide à la décision (OAD) ont été conçus et sont utilisés pour répondre à des questions du type "Dois-je traiter maintenant contre tel ou tel bioagresseur" depuis plusieurs décennies (par exemple (Zadoks 1981)). Cependant, comme nous l'avons vu précédemment (partie VI.2.a)), l'agroécologie nécessite d'élargir à la fois l'échelle temporelle (de quelques jours à la rotation complète des cultures) et **l'échelle spatiale** (des décisions individuelles prises pour un champ donné aux décisions prises collectivement par les exploitations agricoles d'un même **paysage**). Par conséquent, les outils d'aide à la décision classiques ne sont plus suffisants et d'autres approches visant à faciliter la prise de **décision collective** doivent être développées. L'une de ces approches utilise des ateliers de conception de systèmes de culture où une série d'ateliers réunissant tous les acteurs concernés permet 1) de partager une vision commune de la question traitée, 2) de proposer des systèmes de culture candidats et leur organisation spatiale, 3) d'évaluer ex ante les performances attendues (avec éventuellement plusieurs boucles des étapes 2 et 3 pour

améliorer les performances si elles sont jugées insuffisantes) et 4) de tester expérimentalement les meilleurs systèmes de culture (Hossard et al. 2013). La modélisation peut être particulièrement utile à l'étape 1, notamment si le modèle est conçu par ou avec les acteurs, et à l'étape 3, pour prévoir les résultats attendus du système, en particulier lorsque les systèmes de culture candidats sont trop exotiques pour que les experts puissent estimer leurs performances à partir de leur expérience passée, ou lorsque des interactions complexes sont susceptibles de se produire entre les champs du paysage. Plusieurs modèles ont été développés pour représenter le développement spatio-temporel des ravageurs et des organismes utiles dans les paysages agricoles, pour les insectes (Lee et al. 2007; Bianchi et al. 2009; O'Rourke and Jones 2011; Vinatier et al. 2013), les maladies (Kampmeijer and Zadoks 1977; Skelsey et al. 2009; L^ô-Pelzer et al. 2010) et les mauvaises herbes (Colbach 2009), mais tous ces modèles ne prennent en compte qu'un seul système culture-nuisibles en même temps, et ne sont donc pas bien adaptés à la conception de stratégies de protection intégrée des cultures. Le cadre de modélisation présenté dans l'Encadré 16 permet, lui, de construire facilement des modèles multi-bioagresseurs.

d) La modélisation pour rendre appréhensible la complexité... des modèles eux-mêmes

Un autre problème lié à l'utilisation de modèles de ravageurs pour la pratique de la lutte intégrée est que le **délai d'élaboration du modèle** est souvent plus long que la **durée de la question agronomique** (temps entre la (ré)émergence d'un ravageur et son remplacement par d'autres). Par exemple, de graves attaques de colza par des méligèthes en 1999 (Ballanger 2006) ont conduit à de nouvelles recherches sur ce ravageur, qui ont permis d'acquérir des connaissances sur l'effet de la composition du paysage sur la dynamique des coléoptères ravageurs et le taux de parasitisme (Rusch et al. 2011, 2012, 2013). Puis le projet de recherche suivant a permis de construire un modèle mécaniste de la dynamique du ravageur et de son contrôle par l'un de ses parasitoïdes (Vinatier et al. 2012). Malheureusement, dix ans après le début de ce thème de recherche, le méligèthe n'était plus un problème majeur du colza, grâce à l'introduction de nouveaux insecticides (Ballanger 2010). Ce n'est qu'un exemple : le délai entre le début de la recherche et l'impact socio-économique est souvent d'environ 10 ans (par exemple, une étude des projets financés par le gouvernement australien a observé un délai moyen de 9 ans (Allen Consulting Group 2005)) et ce décalage entre le calendrier de la recherche et l'urgence des questions pratiques pose un problème pour la protection des cultures. Afin de produire des modèles capables de répondre aux questions agronomiques pertinentes dès qu'elles se posent, il est nécessaire de raccourcir le cycle de développement des modèles. Dans l'Encadré 16, je présente un exemple de cadre de modélisation qui permet de **raccourcir le temps nécessaire pour développer un modèle**, via l'utilisation de bibliothèques de fonctions pré-codées et la possibilité de transposer par copier-coller des parties de modèles d'un bioagresseur à un autre. Il permet également de **mieux comprendre ce que fait le modèle** grâce à la séparation complète entre la spécification du modèle et la "cuisine interne" du modèle qui permet de le faire tourner et de visualiser les sorties, et grâce à une structure hiérarchique qui permet de naviguer dans la structure du modèle en allant du plus général au plus particulier.

Encadré 16 : MUSCLR-PODYAM : un cadre de modélisation pour construire des modèles de dynamiques de populations multi-espèces dans les mosaïques paysagères

Un cadre de modélisation est un outil moins générique qu'une plateforme (par exemple STELLA ou Simulistics) mais plus adapté à un domaine d'application spécifique, ici la simulation des populations de ravageurs et d'ennemis naturels dans les paysages agricoles. Le cadre de modélisation proposé ici comporte deux composantes : PODYAM, une interface graphique qui aide l'utilisateur à construire la "recette" de son modèle (c'est-à-dire toutes les spécifications du modèle) et MUSCLR, un ensemble de fonctions R qui transforme cette recette en un modèle exécutable. De cette manière, l'utilisateur peut construire et exécuter des modèles sans aucune écriture de code, et les fonctions peuvent être partagées et réutilisées entre les modèles.

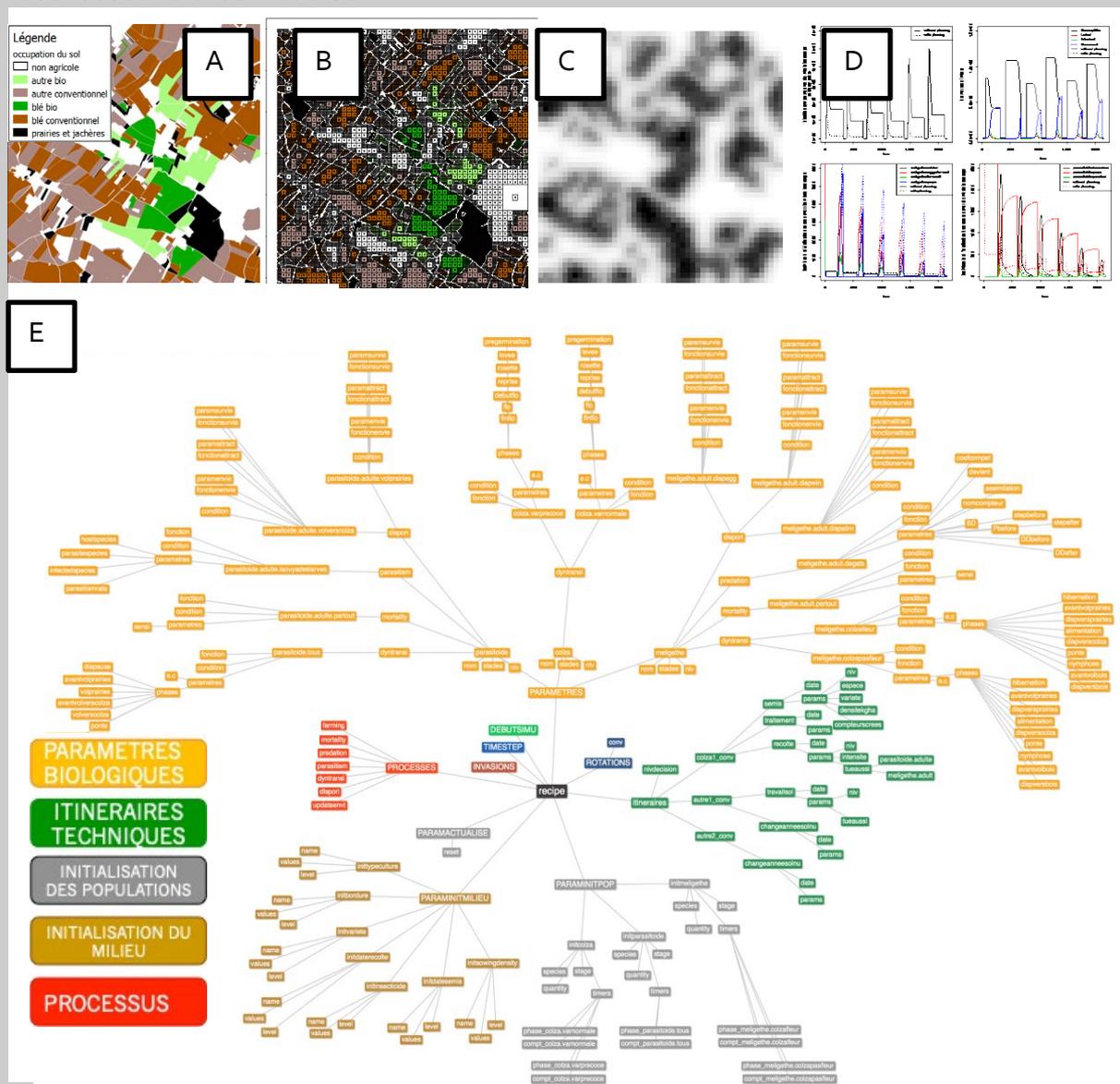


Figure 17 : (A) exemple de paysage agricole (5 km x 5 km) où les parcelles sont catégorisées en fonction de leur caractère hôte (par exemple pour une maladie du blé) et leurs pratiques (par exemple bio/non bio), (B) représentation de ce paysage à l'aide d'une hiérarchie d'échelles emboîtées (pixels de 1m, 5m, 25m et 125m de côté) et "simplification" des pixels homogènes (un seul pixel de niveau inférieur gardé dans les pixels homogènes), (C) exemple de dispersion d'un organisme à l'échelle des pixels de niveau 2, (D) dynamiques simulées de 3 bioagresseurs (phoma du colza, rouille du blé, méligèthe du colza) et d'un parasitoïde du méligèthe et (E) Description hiérarchique du système tri-trophique colza-méligèthe-parasitoïde (constituant une "recette" à partir de laquelle MUSCLR peut construire un modèle de simulation).

La spécificité de MUSCLR (multi-scale landscapes in R) est sa représentation de l'espace par plusieurs échelles emboîtées (cf. Figure 17B), pour que chaque population d'organismes soit représentée à une échelle pertinente. Ces échelles multiples donnent également la possibilité de "simplifier" des pixels lorsqu'ils sont dans un environnement homogène ; ainsi, on ne détaille tous les pixels que dans les zones d'interfaces entre habitats différents et on économise du temps de calcul.

Les organismes (cultures, bioagresseurs, auxiliaires) sont représentés de façon générique, par des compartiments qui représentent soit la biomasse de différents organes à l'échelle du couvert (cas des plantes cultivées), soit les effectifs dans différents stades (souvent utilisé pour les insectes), soit les effectifs dans les différents statuts des sites (souvent utilisé pour les maladies). Les biomasses de ces compartiments sont modifiées par des processus, qui sont simulés à l'aide de fonctions emboîtées : une fonction peut en appeler une autre, et le nom de la fonction appelée est un paramètre de la fonction appelante. Cela permet une grande modularité et une représentation hiérarchique du fonctionnement du modèle : on visualise tout d'abord les caractéristiques les plus générales du modèle ou du module avant d'aller explorer chaque processus et sous-processus plus en détail (cf. Figure 17E).

Enfin, l'originalité de l'approche est l'accent mis sur l'interface de construction du modèle (par opposition aux modèles classiques, qui mettent l'accent sur la réalisation des simulations) : la manipulation du modèle pour faire tourner les simulations et analyser les résultats est laissée au choix de l'utilisateur, qui peut faire appel à ses packages R préférés. Par contre, l'interface développée ici (PODYAM : Population Dynamics in Agricultural Mosaics) permet de construire de façon hiérarchique une description du modèle (par exemple le choix des espèces puis le choix des processus pour chaque espèce puis le choix des formalismes pour chaque processus et enfin le choix des paramètres pour chaque formalisme, ou encore le choix des espèces de la rotation puis le choix des pratiques pour chaque terme de la rotation et enfin le choix des paramètres pour chaque pratique). Cette description au format texte est ensuite lue par MUSCLR pour construire "à la demande" le modèle correspondant en allant chercher les fonctions désirées dans la bibliothèque de fonctions. Une courte démonstration de cette interface de construction de modèle est disponible [ici](https://youtu.be/IDphbQ3bJWk) (<https://youtu.be/IDphbQ3bJWk>)

4. Conclusion

L'agroécologie est donc une solution intéressante pour résoudre une partie des problèmes de l'agriculture moderne. Cette approche est certes complexe, mais on a des moyens pour rendre intelligible cette complexité, alors pourquoi les agriculteurs sont-ils aussi réticents aux apports de l'agroécologie ?

Le problème n'est pas (uniquement) un problème de connaissances, car on connaît (le plan Ecophyto l'a montré) des solutions techniques basées sur l'agroécologie qui permettent de réduire significativement l'utilisation de pesticides sans perte de production, en tout cas en grandes cultures. C'est donc un problème d'adoption de l'agroécologie. Mon projet s'oriente donc dans cette direction. Mes compétences et mes inclinaisons me poussent à essayer de

développer des outils pour les agriculteurs, pour les aider à **réduire l'incertitude** et à mieux **se projeter dans l'avenir**.

C'est particulièrement important pour l'agroforesterie, dont les freins à l'adoption sont nombreux: parmi toutes les pratiques agroécologiques étudiées par Wezel et collaborateurs, c'est l'agroforesterie pour laquelle le potentiel de développement a été évalué comme étant le plus faible (Wezel et al. 2014), car elle est perçue comme une pratique désuète et réduisant le rendement des cultures.

VII. Projet : le numérique au service de l'agroécologie

L'opinion publique associe la science et la technologie à une agriculture industrialisée, non respectueuse de l'environnement (ifop 2017). Il est vrai que les premiers développements de l'agriculture numérique, en particulier l'agriculture de précision, ont pu être utilisés pour légitimer l'usage des pesticides et fertilisants chimiques (Wolf and Wood 2010). Pourtant, **la corrélation high-tech-agriculture industrielle versus low-tech-agroécologie n'a pas lieu d'être**. En effet, il existe de nombreuses applications numériques qui pourraient être utiles à l'agroécologie. Le "numérique" englobe plusieurs activités : la collecte de données, leur analyse, leur échange, leur stockage, leur utilisation pour contrôler des automates, etc. (Bellon-Maurel and Huyghe 2016). Toutes ces tâches pourraient être **utiles à l'agroécologie**. Ainsi la forte dépendance au contexte des processus agroécologiques nécessite de bien caractériser l'environnement biotique et abiotique, de l'échelle locale à l'échelle du paysage, ce qui bénéficierait grandement de l'utilisation de capteurs connectés et/ou embarqués, de proxidétection et d'imagerie satellite, ainsi bien sûr que des bases de données pour stocker ces informations et les partager entre agriculteurs d'un même territoire. L'analyse de données issues d'agroécosystèmes complexes nécessite des techniques avancées (Deep learning, machine learning) pour pouvoir tirer des conclusions de données très bruitées et à multiples facteurs imbriqués. Par ailleurs le pilotage des systèmes agroécologiques peut être facilité par l'utilisation d'outils d'aide à la décision, la géolocalisation et le traçage automatique des interventions. L'échange de données (via les technologies web, les réseaux IoT (Internet of things)) et d'informations (via les réseaux sociaux par exemple) peut favoriser le développement d'une agriculture intensive en savoir plutôt qu'en intrants, tout en rapprochant les citoyens de l'agriculture via les sciences ouvertes. La complexité de l'agroécologie peut être abordée par des dispositifs pédagogiques nouveaux permis par le numérique : MOOC, jeux sérieux (Jouan et al. 2020). Même l'utilisation de robots peut permettre de se passer d'intrants qui ne servent qu'à faciliter ou remplacer les interventions des agriculteurs (mais il n'est pas sûr que le gain en intrants compense le coût environnemental de la fabrication et de la mise en œuvre de ces robots, il faudrait faire une analyse de cycle de vie). Tous ces outils peuvent également apporter de l'autonomie aux agriculteurs qui expérimentent des systèmes innovants, en leur permettant de collecter des données sur les résultats de leurs pratiques, de mener leurs propres expérimentations, de les analyser et de partager leurs résultats. Pour la conception de systèmes de cultures agroécologiques, la modélisation permet d'explorer une multitude de scénarios qu'on ne pourrait pas tester expérimentalement et de co-concevoir des systèmes de cultures avec les acteurs (conseil, agriculteurs) en discutant autour des sorties du modèle, ce qui permet une évaluation ex ante des systèmes co-conçus.

J'ai donc décidé d'explorer la voie du numérique au service de l'agroécologie. Le projet que je propose de développer dans les années à venir a pour objectif de développer des **outils numériques facilitant la conception de systèmes agroforestiers**, en explorant trois axes : apporter plus d'interactivité dans les ateliers de conception en atelier, permettre l'évaluation ex ante de nouveaux systèmes agroforestiers et améliorer la perception des agriculteurs sur ce que pourrait être un système agroforestier sur leurs propres parcelles.

1. Développer un support de conception de systèmes agroforestiers

Les bénéfices attendus de l'agroforesterie (productivité accrue – en incluant les produits des arbres bien sûr), stockage de carbone, protection des sols et des eaux, conservation de la biodiversité) dépendent à la fois de la structure du système (essences, distance entre lignes d'arbres et largeur des bandes non cultivées sous les arbres), de leur âge ainsi que des

pratiques de gestion des arbres, des cultures (usage de pesticides en particulier) et de la bande non cultivée (fréquence et intensité des fauches). Il existe donc de nombreux leviers de gestion qui permettent de piloter les régulations biologiques de ces agroécosystèmes, d'où la nécessité de **concevoir des systèmes agroforestiers** en prenant en compte la **complexité des interactions et leurs évolutions sur le temps long**. Les combinaisons d'espèces, de configurations spatiales et d'itinéraires de gestion sont donc innombrables, et influencent toutes les performances des systèmes agroforestiers. Ces performances concernent :

- la rentabilité économique, qui est dépendante de la productivité et donc des équilibres compétition/facilitation mais aussi des débouchés des produits (en particulier produits des arbres : bois mais pas seulement) ou des charges (par exemple la main d'œuvre pour tailler les arbres, que les agriculteurs négligent souvent au détriment de la qualité du bois)
- les impacts environnementaux (stockage du carbone, maintien de la biodiversité, qualité de l'eau, besoins en irrigation, etc.)
- les aspects paysagers.

La conception de systèmes agroforestiers multiperformants nécessite donc de multiples compétences qui vont bien au-delà de ce que peut savoir un agriculteur seul. **La conception** de systèmes agroforestiers est donc souvent **réalisée à plusieurs**, au minimum un agriculteur et un conseiller agroforestier, ou plusieurs agriculteurs et un ou plusieurs conseillers, jusqu'à des ateliers participatifs (Berthet et al. 2016) qui regroupent des chercheurs spécialistes de différentes disciplines, des conseillers, plusieurs agriculteurs et d'autres acteurs du territoire (syndicats de bassin...). Cela permet de concevoir des systèmes innovants en **combinant les connaissances scientifiques et empiriques** grâce au dialogue entre des chercheurs et des agriculteurs ou conseillers (cf. partie VI.2.b)(4)). Même dans les cas les plus simples, l'agriculteur qui souhaite mettre en place un projet agroforestier est souvent accompagné par un conseiller agroforestier.

Ces ateliers utilisent pour l'instant des outils privilégiant soit la dimension spatiale (cartes et plans, "maquettes" utilisant des pions (Figure 18A) ou des flocons de maïs (Figure 18B) pour représenter les végétaux), soit la dimension temporelle (par exemple Mission Ecophyt'eau® ou Rami fourrager®(Martin 2015)).

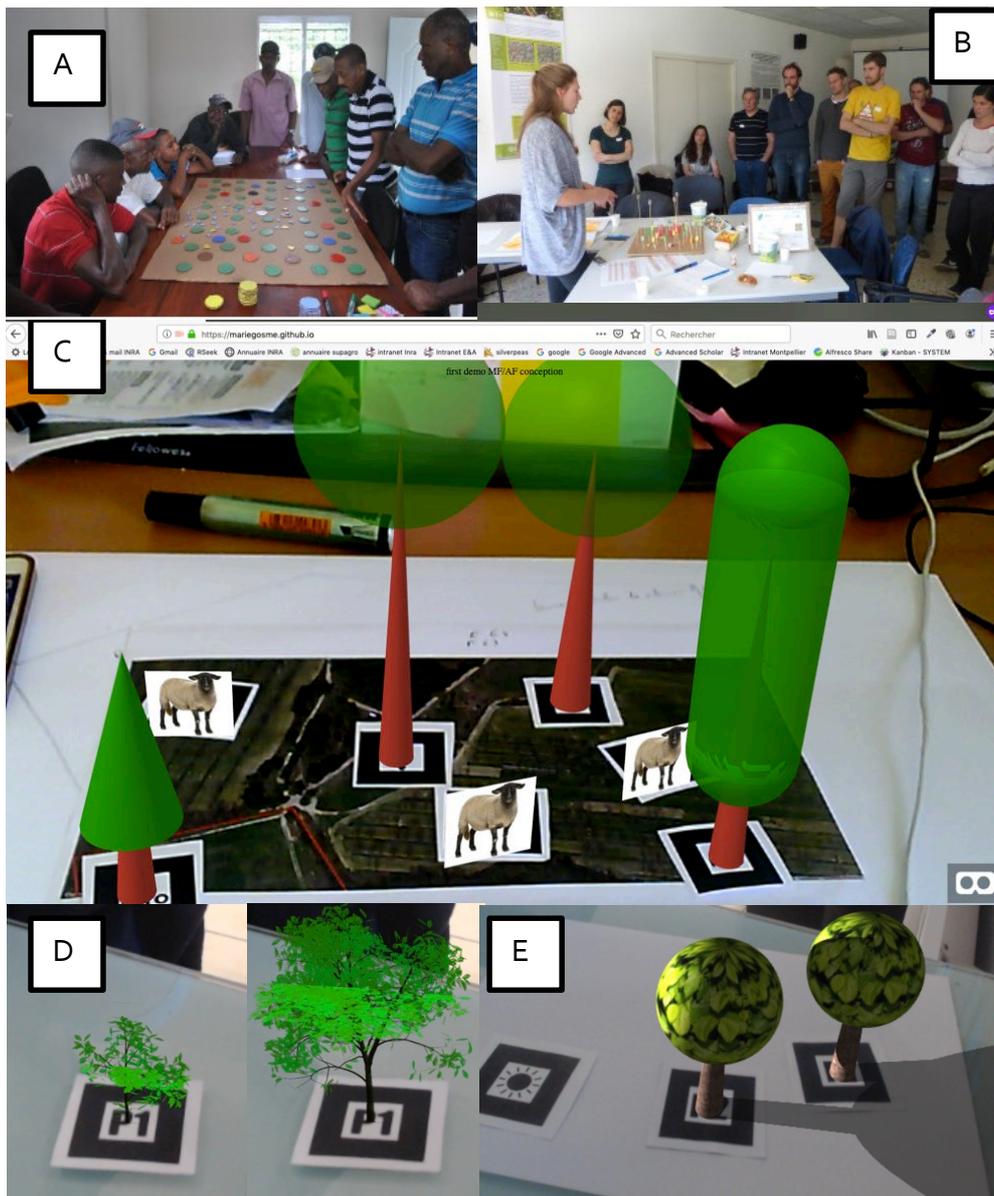


Figure 18 : Outils de support d'ateliers de co-conception de systèmes agroforestiers : (A) atelier de conception de systèmes agroforestiers à cacaoyers avec des jetons, (B) atelier de conception d'un verger diversifié avec des flocons de maïs, (C) première proposition d'utilisation de la réalité augmentée, (D) représentation dynamique de la croissance d'un arbre, (E) représentation de l'ombre projetée par les arbres.

Or l'agroforesterie nécessite de prendre en compte à la fois la dimension spatiale du fait de l'hétérogénéité spatiale créée par la présence des arbres et la dimension temporelle, les interactions arbres-cultures évoluant au cours de la croissance des arbres. Mon idée est d'utiliser la **réalité augmentée** (superposition d'images virtuelles sur des images du monde réel) (Figure 18C) pour **visualiser l'évolution des arbres** (Figure 18D) **et des interactions arbres-cultures** (compétitions pour la lumière (Figure 18E) et l'eau par exemple) en superposition de la maquette physique avec laquelle on continuerait d'interagir comme avec les pions (qui seront remplacés par des marqueurs reconnus par l'ordinateur). Cela permettrait de bénéficier à la fois de l'engagement des participants grâce à l'existence d'un support physique (ce qui facilite le "bidouillage" : on tripote, on essaye, on revient en arrière), et à la fois des possibilités de représentation dynamique et des capacités de prédiction des modèles offertes par une représentation numérique. J'ai soumis cette idée à

des informaticiens du CIRAD et du CNRS, spécialistes de la représentation de l'arbre et du traitement d'image, et obtenu les financements pour une thèse interdisciplinaire que nous co-encadrerons.

Les **questions de recherche en informatique** concernent l'**interfaçage** entre les participants à l'atelier, qui ont différents points de vue dont le partage entre participants est un objectif central des ateliers, et l'ordinateur, qui pourra apporter soit un point de vue différent (celui des chercheurs qui ont conçu le modèle), soit synthétiser les différents points de vue des participants. En effet il faudra trouver des moyens intuitifs de faire passer les informations aux participants, que ce soient des sorties de modèles de simulation ou des avertissements (à l'aide de signaux visuels ou, pourquoi pas, sonores) lorsque des contraintes ne seront pas vérifiées par le système agroforestier en cours de construction. Une seconde question est la façon dont la machine va pouvoir **extraire** de l'image de la maquette le **motif de base du système** (ESFM pour ecosystem services functional motif) (Rafflegeau et al. 2019). En effet, si on veut que l'outil représente des interactions arbres-cultures plus élaborées que la simple projection d'une ombre ponctuelle, il faudra faire tourner des modèles de prédiction, et donc pouvoir les paramétrer à l'aide de la topologie du système identifiée à partir de la maquette. Cette étape fera sans doute appel à la théorie des graphes, puis à une simplification du graphe par recherche de similitudes (car la maquette ne correspondra jamais au millimètre près à l'idée qu'on se fait du système) et enfin une extraction de l'information et un couplage avec un ou des modèles de simulation.

Les **questions agronomiques**, outre bien entendu les questions appliquées auxquelles les ateliers répondront (mise au point de systèmes agroforestiers répondant à des enjeux spécifiés et adaptés aux conditions locales, cf. partie VI.2.b)(4)), concernent la **définition des contraintes** que le système devra respecter (l'exemple bateau est que la largeur entre les lignes d'arbres soit un multiple de la largeur des machines intervenant sur la parcelle (charrue, semoir, épandeur, pulvérisateur, moissonneuse...), plus une marge de sécurité pour éviter que les arbres soient abîmés par le passage des engins). Il faudra également identifier les **informations pertinentes** par type d'acteurs (par exemple le rendement des cultures pour l'agriculteur, la lixiviation d'azote pour le responsable de zone de captage), et les modèles permettant de les calculer (cf. ci-dessous).

2. Evaluer des systèmes agroforestiers co-conçus par des acteurs

Le problème du temps nécessaire pour que l'agroforesterie ait un impact favorable sur les différents enjeux (érosion, qualité de l'eau, biodiversité, et bien entendu rentabilité) est aussi un des freins à son adoption, pour deux raisons : (i) il faut attendre et (ii) les agriculteurs (hors arboriculteurs bien sûr) ont du mal à se projeter sur le temps long, d'une part car ils sont habitués à raisonner le pilotage de leur exploitation à un pas de temps annuel (choix des assolements) ou de quelques années (rotations, investissements, évolution du cheptel etc.) et d'autre part car les références technico-économiques et environnementales sont rares du fait du faible nombre de systèmes agroforestiers matures. La solution au premier problème peut être de gérer les systèmes agroforestiers comme une succession d'étapes, avec certaines espèces présentes uniquement les premières années, lorsque les espèces à croissance lente ne sont pas encore développées : c'est l'agroforesterie successionale (Young 2017). La solution au second problème est d'utiliser des **modèles de simulation**, qui permettent de **prédire l'évolution sur le long terme** de systèmes agroforestiers (cf. partie VI.3.c)(3)). Par exemple, le modèle Hi-sAFé, en simulant la croissance des arbres et des cultures en compétition pour l'eau, l'azote et la lumière, permet de prédire les performances agronomiques (rendement et qualité du grain, production de

bois, stabilité de ces variables face aux aléas climatiques) et environnementales (entre autres lixiviation de l'azote ou stockage du carbone) des systèmes agroforestiers, et donc de fournir au(x) décideur(s) des estimations robustes et justifiées des impacts attendus des systèmes agroforestiers concernant un certain nombre d'enjeux (productivité, résilience, impacts environnementaux...).

On pourrait donc l'utiliser pour **l'évaluation ex ante** de systèmes co-conçus avec des acteurs, pour vérifier si les systèmes qu'ils ont imaginés permettent bien, dans l'état actuel des connaissances (ou plutôt dans le sous-ensemble de connaissances qui ont été intégrées au modèle), d'atteindre les objectifs que les acteurs s'étaient fixés. Il serait également intéressant de tester la résilience des systèmes proposés face au changement climatique, en faisant tourner le modèle sur les projections climatiques du GIEC.

Pour l'instant, le modèle Hi-sAFé n'a jamais été utilisé dans cet objectif, il faut donc mettre en place des procédures de simulation et d'analyse des résultats qui apportent des informations utiles aux acteurs, et réfléchir à la façon de visualiser les résultats pour les **rendre intelligibles de façon intuitive** (pour l'instant, le modèle exporte des fichiers texte à 498 variables et des milliers de lignes (une par jour pour une simulation de 40 ans, cela fait 14600 lignes !).

Il serait même peut-être possible de faire un méta-modèle "simplifiant" le modèle Hi-sAFé et de le coupler avec l'outil de réalité augmentée présenté précédemment pour visualiser certaines variables d'interaction arbres-culture (par exemple zones de compétition aérienne ou racinaire) en superposition sur la maquette physique utilisée en atelier. La difficulté dans ce cas sera de **faire tourner le modèle en temps réel** pour que les utilisateurs puissent explorer en direct les différentes options possibles (le modèle complet a besoin de plusieurs heures de calcul pour faire tourner une simulation complète et n'est donc pas utilisable tel quel). Pour cela il faudra faire une analyse de sensibilité du modèle pour déterminer quelles variables, parmi les variables d'entrées modifiées en temps réel lors de l'atelier, influencent quelles sorties du modèle pertinentes pour les acteurs rassemblés autour de la table, pour savoir sur quel espace de paramètres construire le méta-modèle.

Bien sûr, la question de la **validité du modèle** se posera de façon particulièrement aigüe si l'on veut utiliser le modèle pour guider les décisions des acteurs, car les erreurs auraient des conséquences sur le monde réel (par opposition aux explorations de scénarios qui ont été réalisées jusqu'à présent, qui avaient surtout pour objectif d'expliquer de façon théorique le fonctionnement des systèmes agroforestiers dans différentes conditions). Cela implique de **vérifier expérimentalement** (au moins une partie) des résultats de modélisation. Ce n'est évidemment pas facile lorsqu'on s'attaque à la résilience des systèmes agroforestiers face au changement climatique, mais l'expérience acquise, par exemple via l'utilisation de plusieurs types de dispositif d'interception des pluies (cf. Encadré 5), s'avèrera sans doute utile pour ce travail.

3. Permettre aux acteurs de se projeter dans l'avenir

La plantation d'arbres agroforestiers dans une parcelle implique une prise de risque à court terme pour des bénéfices pas immédiatement perceptibles. De plus, les agriculteurs **manquent de représentations mentales** de l'aspect et des interactions arbres-cultures dans les systèmes agroforestiers, à cause du manque de sites de démonstration suffisamment matures à l'échelle nationale et internationale. Pour preuve, des agriculteurs sont prêts à faire des centaines de kilomètres pour venir visiter le domaine de Restinclières, l'un des seuls sites agroforestiers matures d'Europe (j'ai fait visiter le site à des groupes venus de Suisse, du Portugal et même de république tchèque !). Pour ceux qui n'ont pas la

chance de pouvoir visiter ce site, il est difficile de se représenter l'aspect de parcelles agroforestières et encore plus d'imaginer toutes les interactions arbres-cultures dans les systèmes agroforestiers. Une solution pourrait être l'utilisation de la réalité augmentée, cette fois directement dans les parcelles agricoles, pour **visualiser l'aspect futur des parcelles** dans 10, 20 ou 50 ans (Figure 19). Je fais l'hypothèse que l'impact de la modélisation sera d'autant plus important si elle cible directement les propres parcelles de l'agriculteur, et si les sorties sont visualisées in situ grâce à la réalité augmentée. De même, le fait que l'agriculteur pourra visualiser les effets futurs des systèmes co-conçus (ou qu'il aura conçus par ailleurs) directement sur ses propres parcelles devrait augmenter son adoption des systèmes agroforestiers, ou au moins, s'il décide de ne pas le faire, ce sera en connaissance de cause.



Figure 19 : Photomontage illustrant ce que pourrait donner l'application de réalité augmentée pour visualiser le système agroforestier nouvellement conçu ou nouvellement planté : aspect de la parcelle dans 10, 20, 30 ou 40 ans.

Les **questions informatiques** que cette démarche soulève sont à la fois d'ordre technique (comment calculer la géolocalisation et l'orientation du téléphone avec suffisamment de précision pour que les arbres soient au bon endroit et que leur position à l'écran s'ajuste de façon précise aux déplacements de l'utilisateur), et également scientifiques : comment réaliser un **pavage de l'espace** (qui n'est pas un plan: les parcelles peuvent avoir une topographie marquée) avec le motif identifié dans la partie VII.1 tout en **respectant des contraintes** (tournières, éléments topographiques dans la parcelle ou aux abords...). D'un point de vue **agronomique**, les enjeux seront comme précédemment **d'identifier les critères d'évaluation pertinents** pour les acteurs, calculables à partir des informations issues de l'atelier de conception et visualisables en 3D.

4. Objets d'étude et projets associés

J'aimerais continuer à diversifier mes systèmes d'étude, afin d'acquérir une bonne expertise sur plusieurs systèmes agroforestiers afin de répondre aux demandes des agriculteurs et de la profession, qui ont besoin de connaissances sur les systèmes agroforestiers qui se développent le plus actuellement.

J'envisage de tester les outils facilitant l'animation d'ateliers de co-conception de systèmes agroforestiers dans le cas de **l'agroforesterie viticole** (Figure 20), qui intéresse de plus en plus (particulièrement depuis l'événement de canicule extrême de juin 2019) des groupements de viticulteurs (GIEE IGP Cévennes, GIEE Vignerons du Ventoux, Syndicat des cote du Rhône, Association VIVR' etc.). Je participe donc au montage d'un projet CASDAR,

coordonné par le bureau d'études AGROOF qui vise à favoriser le développement de l'agroforesterie (via, entre autres, la co-conception de systèmes innovants), quantifier les performances agronomiques et économiques de ces systèmes, et évaluer leurs impacts sur la biodiversité.



Figure 20 : Vignes associées à des pins pignon

En ce qui concerne l'évaluation par simulation numérique de systèmes agroforestiers conçus, le travail étant prévu dans le cadre du projet Biodiversify, qui est centré sur la Méditerranée, je vais commencer par me pencher plus particulièrement sur les **systèmes agroforestiers à base d'oliviers**.



Figure 21 : Systèmes agroforestiers à base d'oliviers : oliviers dispersés dans une parcelle de blé (A) et oliviers alignés, permettant une mécanisation des cultures intercalaires (B) ©Yann Arthus-Bertrand

Les systèmes agroforestiers basés sur l'olivier sont très répandus dans la région méditerranéenne (den Herder et al. 2017) en raison de l'effet bénéfique des arbres sur les microclimats des régions chaudes et sèches (Mosquera-Losada et al. 2012). Cependant, la majorité des systèmes agroforestiers basés sur l'olivier sont des vestiges de systèmes traditionnels (Figure 21A), qui ne conviennent pas à l'agroforesterie moderne, mécanisée. Au contraire, la culture moderne en allées, où les arbres sont alignés pour permettre un accès facile par des machines (Figure 21B), est rare, en particulier pour les systèmes à base d'oliviers. Pourtant, une méta-analyse sur l'effet de cultures intercalaires sur production d'arbres fruitiers (dont l'olivier) en milieu méditerranéen a montré une augmentation de la matière organique du sol, une tendance à l'amélioration de la teneur en azote, et pas d'effet négatif sur le rendement des fruitiers (Morugán-Coronado et al. 2020). Cela indique le

potentiel de l'agroforesterie pour augmenter la productivité des vergers en milieu méditerranéen tout en réduisant le risque d'érosion et en améliorant la fertilité du sol.

Malheureusement, le modèle Hi-sAFe ne représente pour l'instant que des arbres à bois (noyer, peuplier, merisier). J'ai donc **obtenu le financement d'une thèse** (financement ANR/Fondation de France) que je co-encadrerai avec un collègue spécialiste des arbres fruitiers, et en collaboration avec un chercheur du CREA en Italie, spécialiste de l'olivier. L'objectif de cette thèse est dans un premier temps **d'adapter le modèle Hi-sAFe à l'olivier** (adaptation des formalismes à un arbre fruitier à feuilles persistantes, puis paramétrisation pour l'olivier). Dans un second temps, le modèle sera **testé sur des données** acquises dans le cadre du projet Biodiversify et enfin il sera utilisé pour **évaluer ex ante** les systèmes agroforestiers co-conçus avec des acteurs dans le cadre de ce même projet.

Enfin, pour l'outil de visualisation, il est important de pouvoir représenter de façon réaliste une grande diversité d'espèces fréquemment utilisées en agroforesterie. Pour l'instant, les espèces ciblées sont le noyer hybride, le peuplier, le robinier faux-acacia, le merisier, le paulownia, le chêne pubescent, l'olivier, le pommier, le grenadier et le pêcher. Le travail de création des représentations des arbres sera réalisé par un collègue de l'UMR AMAP, avec qui je co-encadre une thèse dont j'ai **obtenu le financement** (financement #DigitAg/INRAE) sur ce sujet. L'objectif de cette thèse interdisciplinaire sera de développer une suite d'outils numériques intégrant entre autres les outils présentés dans les trois points précédents. Cette intégration pourrait suivre le schéma de la Figure 22, la partie gauche correspondant aux **ateliers de co-conception**, où des marqueurs physiques sont (dé)placés pour créer une maquette représentant un système agroforestier, l'outil détectant les changements et extrayant le motif fonctionnel pour ensuite faire tourner des modèles de simulation simples en temps réel pour calculer les informations (croissance des arbres, zones de compétitions trop importantes entre arbres et cultures, distance de dispersion potentielle des auxiliaires etc.) à afficher sur la vidéo de la maquette, pour **guider les acteurs** dans les éléments à faire évoluer. Le motif fonctionnel final est ensuite extrait, éventuellement finalisé par l'animateur de l'atelier (choix des variétés, des porte-greffes, calage précis des distances etc.) et répété pour emplir la parcelle décrite par l'animateur, en respectant un certain nombre de contraintes liées à la topographie particulière de la parcelle. Par ailleurs un ou des modèles de simulations plus précis peuvent être utilisés pour calculer des indicateurs pertinents, par exemple cartographie du rendement, vitesse de croissance des arbres ou dispersion des bioagresseurs ou auxiliaires. Enfin, la position de tous les arbres étant géoréférencée, on pourra se rendre sur la parcelle pour **visualiser in situ** l'aspect des arbres et les indicateurs calculés, pour discuter des résultats attendus et éventuellement reprendre une itération de conception.

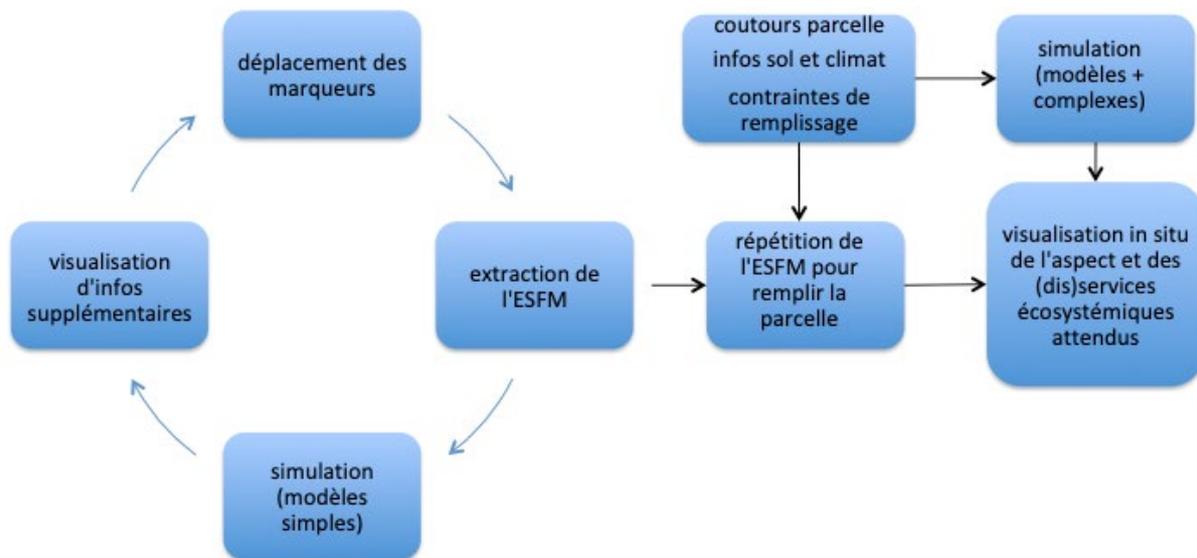


Figure 22 : Schéma d'intégration de l'outil de réalité augmentée pour la conception "sur table", de la modélisation des systèmes agroforestiers et de la visualisation in situ. ESFM : ecosystem services functional motif (Rafflegeau et al. 2019).

Tous ces cas d'application incluent une forte composante participative : implication de GIEE de viticulteurs via le projet CASDAR, organisation d'ateliers d'agriculteurs et autres acteurs (conseillers, industriels, etc.) via le projet Biodiversify. Bien que je ne sois pas moi-même spécialiste, j'ai déjà travaillé avec des spécialistes de la recherche participative (cf. Encadré 8 et Encadré 9). Il me semble important que la conception de systèmes de culture soit réalisée de manière participative, pour que la conception bénéficie des connaissances locales des agriculteurs, et que les systèmes conçus aient une meilleure chance d'être adoptés. Les outils que je propose de développer seront également **co-conçus avec les acteurs du monde agricole** qui en seront les utilisateurs, à la fois pour s'assurer qu'ils répondent bien à leurs besoins, mais aussi pour que l'innovation soit responsable, c'est à dire que nous soyons en capacité d'anticiper les problèmes causés par nos produits, de répondre aux problèmes émergents, d'inclure des publics divers pour tenter de répondre à leurs préoccupations, et enfin d'adopter une approche réflexive et flexible du développement (Klerkx et al. 2019).

5. Modalités de l'encadrement des doctorants

J'ai suivi la formation "encadrer un doctorant" proposée par l'école doctorale GAIA les 1^{er} et 2 décembre 2016. J'en ai retenu d'une part des méthodes de gestion de projet à transmettre aux doctorants (gestion du temps, planification des tâches, etc.) ainsi que la nécessité de faire une réunion de lancement du projet avec tous les co-encadrants, puis des réunions formelles avec les co-encadrants toutes les 6 à 8 semaines, et des réunions hebdomadaires de suivi de l'avancement du travail avec le doctorant toutes les semaines. J'ai également beaucoup apprécié l'exercice de **vision partagée des responsabilités**, que j'ai réalisé pour deux thèses que je co-encadre, en laissant les gens répondre en texte libre sur 3 questions : quelles sont selon vous les responsabilités de l'encadrant ? Quelles sont selon vous les responsabilités du doctorant et quelles sont selon vous les responsabilités mutuelles des co-encadrants ? Les résultats sont assez intéressants (en plus des échanges que la discussion des résultats a suscités). Le Tableau 2 indique, pour chaque groupe de responsabilité, le pourcentage de réponse concernant ce groupe parmi les réponses des doctorants d'une part et des encadrants d'autre part. On voit par exemple que la vision des responsabilités est

assez différente entre les doctorants et les encadrants : les doctorants attendent de leurs encadrants qu'ils les forment à la gestion de projet et qu'ils leur permettent de démontrer leurs qualités scientifiques, alors que les encadrants estiment que leur premier rôle est de former les doctorants dans le domaine d'application de la thèse et de leur fournir les moyens de réaliser leur thèse dans de bonnes conditions. Par contre, les encadrants attendent en retour que le doctorant fasse preuve de qualités scientifiques, alors que les doctorants ont à cœur de bien communiquer avec leur encadrant. Enfin, encadrants comme doctorants estiment que l'essentiel dans les relations mutuelles entre co-encadrants est une bonne communication pour arriver à un consensus (éventuellement après un débat scientifique) sur les objectifs de la thèse et les orientations à court et moyen terme. Ces résultats sont juste indicatifs, car l'échantillon est très réduit (2 doctorants et 4 encadrants, et les chiffres recouvrent une grande disparité entre individus (Figure 23) cependant une bonne communication semble être une condition essentielle au bon déroulement d'une thèse. J'ai donc mis en place avec les doctorants que j'encadre différents **calendriers de réunions** : une réunion hebdomadaire courte (30 à 45 minutes) avec chacun des doctorants pour faire le point du travail de la semaine et organiser le travail de la semaine suivante et une réunion plus formelle toutes les 6 semaines avec tous les co-encadrants, pour discuter de choix à réaliser, de stratégie de valorisation des résultats ou pour réactualiser le calendrier prévisionnel.

Tableau 2 : vision des responsabilités : moyenne des pourcentages de mention par personne, selon que c'est un doctorant ou un encadrant qui répond (100 %= la personne ne parle que de cet aspect)

	groupe de responsabilité	exemples	doc	enc
responsabilités de l'encadrant vis-à-vis du doctorant	former aux compétences métier	biblio, formulation d'une question scientifique, analyse et interprétation des résultats, communications, etc.	6	14
	fournir un environnement favorable	moyens matériels, financiers, disponibilité en temps, interface avec le bailleur, questions administratives, etc.	3	14
	former aux compétences projet	organisation, outils de suivi, traçabilité	10	9
	favoriser l'expression de savoir-être	curiosité, audace, indépendance	10	7
	apporter une vision plus large, anticiper les problèmes	recul sur le domaine, éviter de tourner en rond	4	8
	rôle de garant de l'institution académique	comité de pilotage, jury, manuscrit de thèse, soutenance	0	6
	faciliter l'insertion professionnelle	réseau académique et professionnel,	4	1
responsabilités du doctorant	communication	fournir les résultats, demander de l'aide	21	5
	faire preuve de savoir-être	rigueur, honnêteté scientifique, curiosité, audace	5	12
	investissement personnel	volonté de se former	8	3
	respect des règles	règles de l'école doctorale (copil, quota de formation, publication, soutenance), de confidentialité, engagements auprès du bailleur, etc.	9	0

	acquérir des compétences métier	connaissances scientifiques, biblio	0	2
	gérer son projet	gestion du temps	0	1
	publier		0	1
responsabilités mutuelles des co-encadrants les uns envers les autres	communication	écoute, cohérence des messages transmis au doctorant, entente sur les objectifs	10	8
	jouer le jeu de la pluridisciplinarité	s'initier au domaine des autres, co-signature des publications, savoir transmettre les questions lorsque c'est hors du domaine de compétence	9	4
	créer un environnement humain favorable	bonne humeur sympathie, bienveillance, prise en compte des contraintes des uns et des autres	0	3
	contrôle mutuel	vérifier que chacun assume ses responsabilités, prendre le relais en cas d'indisponibilité d'un encadrant	3	0
	implication	accorder du temps pour les réunions	1	1

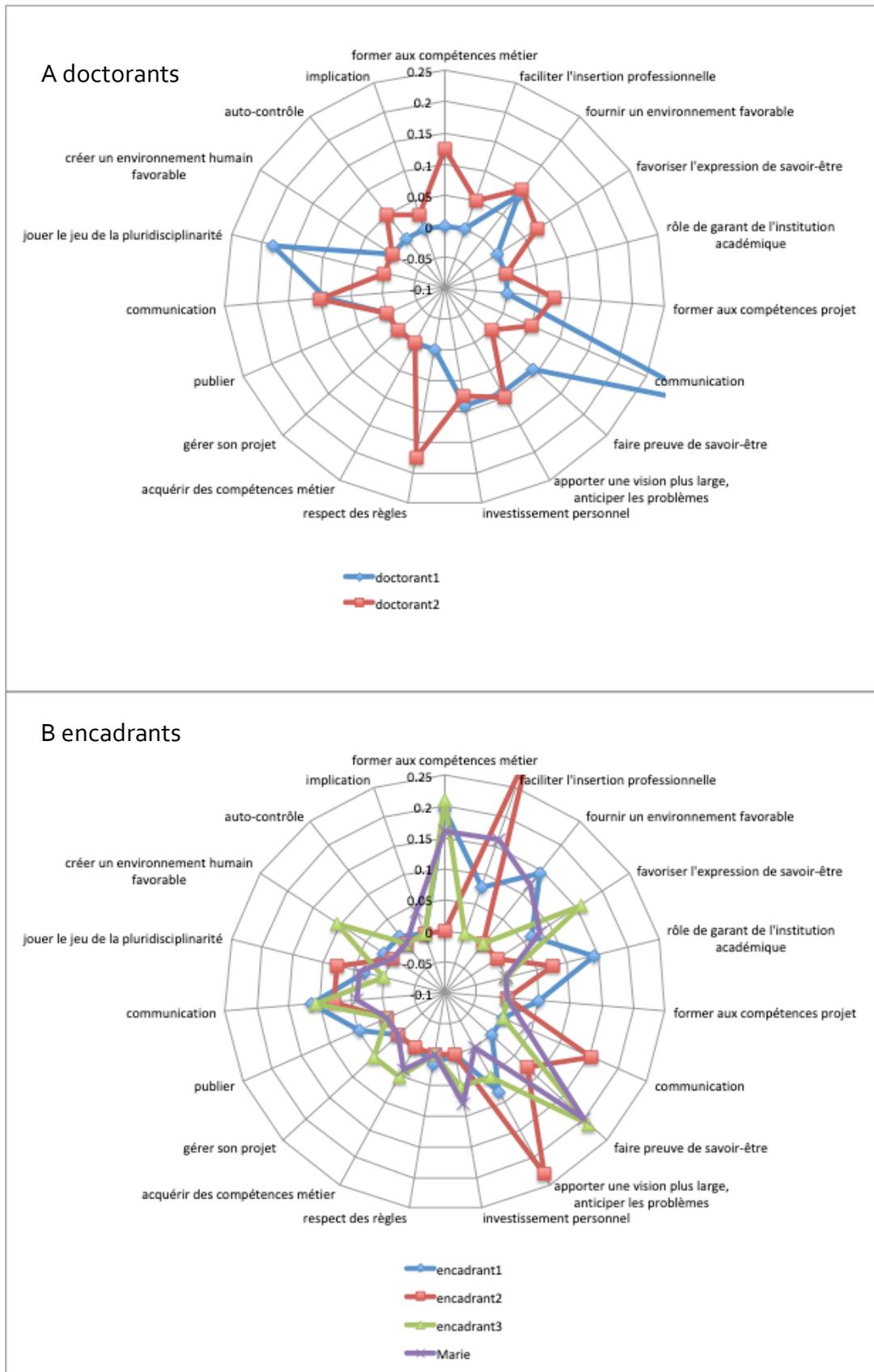


Figure 23 : vision des responsabilités encadrants-doctorant : poids des différentes responsabilités du doctorant, de l'encadrant et des co-encadrants dans les réponses de deux doctorants et 4 encadrants

VIII. Conclusion

Mon parcours scientifique m'a permis d'aborder une **diversité de leviers de l'agroécologie** : contrôle biologique par conservation des bioagresseurs, variétés adaptées aux systèmes à bas niveau d'intrants, agroforesterie. L'évolution de mes approches est caractérisée par deux tendances fortes : (i) la **complexité croissante** des processus et interactions prises en compte (de l'interaction entre deux pratiques sur une maladie, à la prise en compte d'un complexe de bioagresseurs dans un paysage et jusqu'à l'étude de systèmes complexes, nécessitant une reconception du système, tels que l'agroforesterie) et (ii) **l'intégration croissante des acteurs** (de pas du tout d'interactions, à des expérimentations sur parcelles d'agriculteurs, des enquêtes auprès d'agriculteurs, de la recherche participative et jusqu'à la création d'outils spécifiquement pour les acteurs). Ces évolutions sont représentatives du changement de paradigme nécessaire au développement de l'agroécologie (Lauri 2017).

En parallèle, la révolution numérique qui bouleverse nos sociétés et l'industrie n'épargne pas l'agriculture : on parle **d'agriculture 4.0** (les avis sont partagés pour savoir exactement quelles révolutions ont permis de passer de l'agriculture du néolithique à cette nouvelle forme d'agriculture : révolution agricole anglaise du 18^{ème} siècle avec l'abandon de la jachère au profit du trèfle, mécanisation et révolution verte au 20^{ème} siècle et enfin révolution numérique (Rose and Chilvers 2018) ou intrants chimiques (fertilisants et pesticides) dans les années 1950, agriculture de précision dans les années 1990 et agriculture numérique dans les années 2010 (Bongomin et al. 2020), mais ce terme de 4.0 est également utilisé dans l'industrie pour parler de l'importance croissante des technologies numériques, donc il faut s'arranger pour trouver trois formes d'agriculture précédentes). Bongomin et collaborateurs ont identifié les technologies suivantes pour la conception et la gestion des systèmes agricoles : intelligence artificielle, réalité augmentée, "big data" et "cloud computing". Cependant les applications de la **réalité augmentée en agriculture sont rares** et concernent pour l'instant principalement l'agriculture de précision (guidage du tracteur et visualisation des zones à traiter, par exemple (Santana-Fernández et al. 2010), ou visualisation des endroits où effectuer des prélèvements de sol par superposition d'informations issues de drones (Huuskonen and Oksanen 2018)) et l'éducation (y compris en permettant de visualiser l'aspect futur des plantes (Okayama and Miyawaki 2013)) mais sont, à ma connaissance, **inexistantes pour la conception de systèmes agroécologiques**.

L'agroécologie 4.0 est donc un champ nouveau à explorer qui devrait porter des fruits non seulement intéressants scientifiquement, mais aussi, je l'espère, utiles au développement d'une agriculture suffisamment productive et plus respectueuse de l'environnement. Au sein de l'équipe que j'anime dans l'UMR ABSys, les travaux sur ce thème ne sont pas encore structurés, mais nous avons un potentiel intéressant pour développer des travaux originaux et qui à la fois répondent bien aux enjeux des filières locales et offrent des potentialités de rayonnement international sur un sujet novateur. En effet, **un enseignant-chercheur vient d'être recruté** sur le thème "**Agronomie et Transition Numérique**". Il prévoit, entre autres, de faire intervenir des agriculteurs "connectés" (parfois d'anciens élèves) auprès des étudiants ingénieurs agronomes lors de tables rondes autour des outils numériques, et d'encadrer des projets d'ingénieur sur l'analyse des réseaux sociaux pour faire de la traque à l'innovation et identifier les problématiques agroécologiques actuelles, qui pourraient être les bases de futurs programmes de recherche. La présence du Mas Numérique, une exploitation viticole appartenant à Supagro et servant de plate-forme de test et de démonstration des outils numériques disponibles pour la vigne est une aubaine, puisqu'elle pourra servir de vitrine pour les outils que nous pourrions développer, et nous permettra

également d'entrer en contact avec des viticulteurs curieux des technologies numériques, avec qui nous pourrions collaborer pour de nouveaux développements. Par ailleurs, la présence dans l'équipe d'une **ingénieure de recherches** qui co-anime le **RMT AgroforesterieS et travaille à la DipSO** (Direction pour la Science Ouverte) est une chance pour ouvrir nos recherches à la fois vers les agriculteurs et conseillers et vers les citoyens. Les autres chercheurs ne sont pas en reste, car nous disposons dans l'unité d'une très bonne culture de **l'analyse et de la gestion de la complexité** (y compris via le développement de modèles) ainsi que d'une bonne expérience des recherches participatives. Le fait que nous soyons une unité mixte de recherche sous cotutelle du CIRAD, avec des chercheurs travaillant sur les systèmes agroforestiers complexes à base de café ou de cacao est également un élément favorable car ces systèmes n'ont pas subi l'appauvrissement drastique qu'ont subi les systèmes occidentaux et pourraient être **sources d'inspiration** pour la rediversification de nos systèmes agricoles, tandis que les outils numériques développés pour observer, comprendre et planifier cette biodiversité pourraient également nous être utiles.

IX. Références

- Adl S, Iron D, Kolokolnikov T (2011) A threshold area ratio of organic to conventional agriculture causes recurrent pathogen outbreaks in organic agriculture. *Science of The Total Environment* 409:2192–2197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.02.026>
- Allen Consulting Group (2005) Measuring the impact of publicly funded research [electronic resource] / The Allen Consulting Group. Dept. of Education, Science and Training, Canberra
- Altieri MA (1989) Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 27:37–46. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90070-4](https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90070-4)
- Amigues JP, Debaeke P, Itier B, et al (eds) (2006) Sécheresse et agriculture - Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. INRA, France
- Asseng S, Ewert F, Martre P, et al (2015) Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Clim Change* 5:143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Aubertot JN, Barbier JM, Carpentier A, et al (2005) Pesticides, agriculture and the environment: Reducing the use of pesticides and limiting their environmental impact
- Bai W, Sun Z, Zheng J, et al (2016) Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area. *Agricultural Water Management* 178:281–290. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.007>
- Bakker MM, Govers G, Jones RA, Rounsevell MDA (2007) The Effect of Soil Erosion on Europe's Crop Yields. *Ecosystems* 10:1209–1219. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9090-3>
- Ballanger Y (2006) Note d'information Mèligèthes 2006. http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/Cultures/Colza/insectes_limaces/meligethe_note_2006.pdf. Accessed 1 Oct 2015
- Ballanger Y (2010) Note d'information mèligèthes du colza 2010
- Batary P, Matthiesen T, Tschardt T (2010) Landscape-moderated importance of hedges in conserving farmland bird diversity of organic vs. conventional croplands and grasslands. *Biological Conservation* 143:2020–2027. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.05.005>
- Beckert M, Desseaux Y, Charlier C, et al (eds) (2011) Les variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective. CNRS-INRA, France
- Beillouin D, Ben-Ari T, Makowski D (2019) Evidence map of crop diversification strategies at the global scale. *Environ Res Lett* 14:123001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4449>
- Bellon-Maurel V, Huyghe C (2016) L'innovation technologique dans l'agriculture. *Géoéconomie* 80:159. <https://doi.org/10.3917/geoec.080.0159>
- Berthet ETA, Barnaud C, Girard N, et al (2016) How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *Journal of Environmental Planning and Management* 59:280–301. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1009627>
- Bianchi FJJA, Booij CJH, Tschardt T (2006) Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B - Biological Sciences* 273:1715–1727. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3530>
- Bianchi FJJA, Schellhorn NA, van der Werf W (2009) Predicting the time to colonization of the parasitoid *Diadegma semiclausum*: The importance of the shape of spatial dispersal

- kernels for biological control. *Biological Control* 50:267–274
- Blanchet G, Barkaoui K, Bradley M, et al (2020) Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea - an assessment with a rainfall manipulation experiment in a 25-year-old walnut agroforestry system. *Journal of Agronomy and Crop Science* submitted:
- Boinot S, Poulmarc'h J, Mézière D, et al (2019) Distribution of overwintering invertebrates in temperate agroforestry systems: Implications for biodiversity conservation and biological control of crop pests. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 285:106630. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106630>
- Bongomin O, Yemane A, Kembabazi B, et al (2020) Industry 4.0 Disruption and Its Neologisms in Major Industrial Sectors: A State of the Art. *Journal of Engineering* 2020:1–45. <https://doi.org/10.1155/2020/8090521>
- Bonnin I, Bonneuil C, Goffaux R, et al (2014) Explaining the decrease in the genetic diversity of wheat in France over the 20th century. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 195:183–192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.06.003>
- Brisson N, Mary B, Ripoche D, et al (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18:311–346. <https://doi.org/10.1051/agro:19980501>
- Calcagno V, de Mazancourt C (2010) glmulti: An R Package for Easy Automated Model Selection with (Generalized) Linear Models. *J Stat Softw* 34:1–29
- Caquet T, Gascuel-Oudoux C, Tixier-Boichard M, et al (2019) Réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie. Rapport de synthèse. 108 pp. <https://doi.org/10.15454/heimwa>
- Carson R (1962) *Silent spring*. Fawcett, Greenwich, Conn.
- Chabert A, Sarthou J-P (2017) Practices of conservation agriculture prevail over cropping systems and landscape heterogeneity in understanding the ecosystem service of aphid biocontrol. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 249:70–79. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.005>
- Chizallet M, Prost L, Barcellini F (2020) Supporting the design activity of farmers in transition to agroecology: Towards an understanding. *Le travail humain* 83:33. <https://doi.org/10.3917/th.831.0033>
- Claveirole C (2016) *La transition agroécologique: défis et enjeux*. France
- Colbach N (2009) How to model and simulate the effects of cropping systems on population dynamics and gene flow at the landscape level: example of oilseed rape volunteers and their role for co-existence of GM and non-GM crops. *Environmental Science and Pollution Research* 16:348–360. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0080-6>
- Coucheney E, Buis S, Launay M, et al (2015) Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environmental Modelling & Software* 64:177–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024>
- Dalgaard T, Hutchings NJ, Porter JR (2003) Agroecology, scaling and interdisciplinarity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 100:39–51. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00152-X)
- Dayioglu A, Hepaksoy S (2016) Effects of shading nets on sunburn and quality of “Granny Smith” apple fruits. In: Milatovic D, Milivojevic J, Nikolic D (eds) *III Balkan Symposium on Fruit Growing*. *Int Soc Horticultural Science, Leuven* 1, pp 523–528
- Demestihis C, Plénet D, Génard M, et al (2018) Analyzing ecosystem services in apple

- orchards using the STICS model. *European Journal of Agronomy* 94:108–119. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.009>
- den Herder M, Moreno G, Mosquera-Losada RM, et al (2017) Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 241:121–132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005>
- Dufour L, Metay A, Talbot G, Dupraz C (2013) Assessing Light Competition for Cereal Production in Temperate Agroforestry Systems using Experimentation and Crop Modelling. *J Agron Crop Sci* 199:217–227. <https://doi.org/10.1111/jac.12008>
- Dupraz C, Blitz-Frayret C, Lecomte I, et al (2018) Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. *Agroforestry Systems* 92:1019–1033. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0214-x>
- Dupraz C, Liagre F (2011) *AGROFORESTERIE 2E*, Édition : 2e édition. France Agricole, Paris
- Dupraz C, Wolz KJ, Lecomte I, et al (2019) Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability* 11:2293. <https://doi.org/10.3390/su11082293>
- Garratt MPD, Wright DJ, Leather SR (2011) The effects of farming system and fertilisers on pests and natural enemies: A synthesis of current research. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141:261–270. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.014>
- Gomes LC, Bianchi FJJA, Cardoso IM, et al (2020) Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 294:106858. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>
- Gosme M, de Villemandy M, Bazot M, Jeuffroy M-H (2012) Local and neighbourhood effects of organic and conventional wheat management on aphids, weeds, and foliar diseases. *Agriculture, Ecosystems, Environment* 161:121–129. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.009>
- Gosme M, Lebreton L, Sarniguet A, et al (2013) A new model for the pathozone of the take-all pathogen, *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. *Annals of Applied Biology* 163:359–366. <https://doi.org/10.1111/aab.12060>
- Gosme M, Lucas P (2011) Effect of host and inoculum patterns on take-all disease of wheat incidence, severity and disease gradient. *European Journal of Plant Pathology* 129:119–131. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9700-3>
- Gosme M, Lucas P (2009a) Disease spread across multiple scales in a spatial hierarchy: effect of host spatial structure, and of inoculum quantity and repartition. *Phytopathology* 99:833–839
- Gosme M, Lucas P (2009b) Cascade: an epidemiological model to simulate disease spread and aggregation across multiple scales in a spatial hierarchy. *Phytopathology* 99:823–832
- Gosme M, Poggi S (2016) COPACABANA COmment décrire le PAysage pour CAractériser son effet sur les BioAgressseurs et ennemis NATurels. <https://www6.inra.fr/projet-copacabana/Resultats>
- Gosme M, Willocquet L, Lucas P (2007) Size, shape and intensity of aggregation of take-all disease during natural epidemics in second wheat crops. *Plant Pathology* 56:87–96
- Graves AR, Burgess PJ, Palma JHN, et al (2007) Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering* 29:434–449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.018>

- Griffon M (2013) Qu'est-ce qu'une agriculture écologiquement intensive? Quae, Versailles
- Hajjar R, Jarvis DI, Gemmill-Herren B (2008) The utility of crop genetic diversity in maintaining ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123:261–270. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.08.003>
- Hossard L, Jeuffroy MH, Pelzer E, et al (2013) A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environmental Modelling & Software* 48:17–26. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.014>
- Hughes G, Madden LV (1992) Aggregation and incidence of disease. *Plant Pathology* 41:657–660
- Huuskonen J, Oksanen T (2018) Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 154:25–35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.039>
- ifop (2017) sondage ifop pour l'INRA - Synthèse des principaux enseignements. ifop
- Inurreta-Aguirre HD, Lauri P-É, Dupraz C, Gosme M (2018) Yield components and phenology of durum wheat in a Mediterranean alley-cropping system. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0201-2>
- IPCC (2014) *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge
- IPES-Food (2016) *De l'Uniformité et la Diversité*: Changer de paradigme pour passer de l'agriculture industrielle à des systèmes agroécologiques diversifiés
- Jeuffroy M-H, Casadebaig P, Debaeke P, et al (2014) Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron Sustain Dev* 34:121–137. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0170-9>
- Jose S (2009) Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor Syst* 76:1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Jouan J, De Graeuwe M, Carof M, et al (2020) Learning Interdisciplinarity and Systems Approaches in Agroecology: Experience with the Serious Game SEGAE. *Sustainability* 12:4351. <https://doi.org/10.3390/su12114351>
- Kampmeijer P, Zadoks JC (1977) EPIMUL, a simulator of foci and epidemics in mixtures of resistant and susceptible plants, mosaics and multilines. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, Netherlands
- Kay S, Rega C, Moreno G, et al (2019) Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy* 83:581–593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>
- Klerkx L, Jakku E, Labarthe P (2019) A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 90–91:100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Koestler A (1967) *The ghost in the machine*. Hutchinson & Co, London
- Lacombe C, Couix N, Hazard L (2018) Designing agroecological farming systems with farmers: A review. *Agricultural Systems* 165:208–220. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014>
- Lauri P-É (2017) Applying Agroecological Principles to Crop Protection - Agroecology and Frames of Reference: An Epistemological Reading. In: Deguine J-P, Gloanec C, Laurent P, et al. (eds) *Agroecological Crop Protection*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 17–

- Lauri PÉ, Simon S, Navarrete M, et al (2016) Interdisciplinarity and multiagent interactions for innovations in horticulture – paradigms beyond the words. *Acta Horti* 255–266. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1137.37>
- Le Roux X, Barbault R, Baudry J, et al (eds) (2008) Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective. INRA, France
- Lebreton L, Gosme M, Lucas P, et al (2007) Linear relationship between *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (Ggt) genotypic frequencies and disease severity on wheat roots in the field. *Environmental Microbiology* 9:492–499
- Lee SD, Park S, Park Y-S, et al (2007) Range expansion of forest pest populations by using the lattice model. *Ecological Modelling* 203:157–166. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.031>
- Levin SA (1992) Mathematics and Biology: The interface. Cornell University, Ithaca, NY
- Lin BB (2007) Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144:85–94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>
- Lô-Pelzer E, Bousset L, Jeuffroy MH, et al (2010) SIPPOM-WOSR: A Simulator for Integrated Pathogen POpulation Management of phoma stem canker on Winter OilSeed Rape: I. Description of the model. *Field Crops Research* 118:73–81. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.04.007>
- Marshall DR (1977) The advantages and hazards of genetic homogeneity. *Ann NY Acad Sci* 287:1–20. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1977.tb34226.x>
- Martin G (2015) A conceptual framework to support adaptation of farming systems – Development and application with Forage Rummy. *Agricultural Systems* 132:52–61. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.08.013>
- Mead R, Willey RW (1980) The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Ex Agric* 16:217–228. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010978>
- Médiène S, Valantin-Morison M, Sarthou J-P, et al (2011) Agroecosystem management and biotic interactions: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 31:491–514
- Meier T (2017) Planetary Boundaries of Agriculture and Nutrition – an Anthropocene Approach. In: Science meets comics proceedings of the Symposium on Communicating and Designing the Future of Food in the Antropocene
- Meynard J-M, Aggeri F, Coulon J-B, et al (2006) Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2020) Note de suivi 2018-2019 du plan ECOPHYTO. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation
- Moeller NI (2020) Analysis of Funding Flows to Agroecology: the case of European Union monetary flows to the United Nations' Rome-based agencies and the case of the Green Climate Fund. Centre for Agroecology, Water and Resilience (CAWR), Coventry University, UK
- Möhring N, Wuepper D, Musa T, Finger R (2020) Why farmers deviate from recommended pesticide timing: the role of uncertainty and information. *Pest Manag Sci* 76:2787–2798. <https://doi.org/10.1002/ps.5826>
- Montgomery DR (2007) Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104:13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>

- Morugán-Coronado A, Linares C, Gómez-López MD, et al (2020) The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agricultural Systems* 178:102736. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102736>
- Mosquera-Losada MR, Moreno G, Pardini A, et al (2012) Past, Present and Future of Agroforestry Systems in Europe. In: Nair PKR, Garrity D (eds) *Agroforestry - The Future of Global Land Use*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 285–312
- Nuberg IK (1998) Effect of shelter on temperate crops: a review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems* 41:3–34. <https://doi.org/10.1023/A:1006071821948>
- Okayama T, Miyawaki K (2013) The “Smart Garden” System using Augmented Reality. *IFAC Proceedings Volumes* 46:307–310. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00070>
- O’Rourke ME, Jones LE (2011) Analysis of landscape-scale insect pest dynamics and pesticide use: an empirical and modeling study. *Ecol Appl* 21:3199–3210
- Papaix J, Goyeau H, Cheyron PD, et al (2011) Influence of cultivated landscape composition on variety resistance: an assessment based on wheat leaf rust epidemics. *New Phytologist* 14
- Paut R, Sabatier R, Tchamitchian M (2018) Horticulture agroforestry systems: a modelling framework to combine diversification and association effects. *European Agroforestry Federation*
- Peng X, Thevathasan NV, Gordon AM, et al (2015) Photosynthetic Response of Soybean to Microclimate in 26-Year-Old Tree-Based Intercropping Systems in Southern Ontario, Canada. *PLOS ONE* 10:e0129467. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129467>
- Penvern S, Chieze B, Simon S (2018) Trade-offs between dreams and reality: agroecological orchard co-design. 13th European International Farming Systems Association (IFSA) Symposium, Farming systems: facing uncertainties and enhancing opportunities, 1-5 July 2018, Chania, Crete, Greece 1–12
- Phillips SL, Wolfe MS (2005) Evolutionary plant breeding for low input systems. *J Agric Sci* 143:245–254. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005009>
- Plantegenest M, Le May C, Fabre F (2007) Landscape epidemiology of plant diseases. *Journal of the Royal Society Interface* 4:963–972
- Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Bareche J, et al (2018) No-tillage reduces long-term yield-scaled soil nitrous oxide emissions in rainfed Mediterranean agroecosystems: A field and modelling approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 262:36–47. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.007>
- Plaza-Bonilla D, Léonard J, Peyrard C, et al (2017) Precipitation gradient and crop management affect N₂O emissions: Simulation of mitigation strategies in rainfed Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 238:89–103. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.003>
- Quinkenstein A, Wöllecke J, Böhm C, et al (2009) Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy* 12:1112–1121. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.008>
- Racsko J, Schrader LE (2012) Sunburn of Apple Fruit: Historical Background, Recent Advances and Future Perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences* 31:455–504. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.696453>
- Rafflegeau S, Allinne C, Barkaoui K, et al (2019) Ecosystem services functional motif: a new concept to analyse and design agroforestry systems. p 933 p.

- Reiss ER, Drinkwater LE (2017) Cultivar mixtures: a meta-analysis of the effect of intraspecific diversity on crop yield. *Ecological Applications*. <https://doi.org/10.1002/eap.1629>
- Rey F, Gosselin F, Doré A (2014) Ingénierie écologique: action par et-ou pour le vivant?
- Reynolds HL, Smith AA, Farmer JR (2014) Think globally, research locally: Paradigms and place in agroecological research. *American Journal of Botany* 101:1631–1639. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400146>
- Romero E, Le Gendre R, Garnier J, et al (2016) Long-term water quality in the lower Seine: Lessons learned over 4 decades of monitoring. *Environmental Science & Policy* 58:141–154. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.016>
- Rose DC, Chilvers J (2018) Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. *Front Sustain Food Syst* 2:87. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>
- Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, et al (2014) Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proc Natl Acad Sci USA* 111:3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Rouxel T, Penaud A, Pinochet X, et al (2003) A 10-year survey of populations of *Leptosphaeria maculans* in France indicates a rapid adaptation towards the Rlm1 resistance gene of oilseed rape. *European Journal of Plant Pathology* 109:871–881
- Rusch A, Valantin-Morison M, Roger-Estrade J, Sarthou J-P (2012) Local and landscape determinants of pollen beetle abundance in overwintering habitats. *Agricultural and Forest Entomology* 14:37–47. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2011.00547.x>
- Rusch A, Valantin-Morison M, Sarthou JP, Roger-Estrade J (2013) Effect of crop management and landscape context on insect pest populations and crop damage. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 166:118–125. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.004>
- Rusch A, Valantin-Morison M, Sarthou J-P, Roger-Estrade J (2011) Multi-scale effects of landscape complexity and crop management on pollen beetle parasitism rate. *Landscape Ecology* 26:473–486. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9573-7>
- Sánchez IA, Lassaletta L, McCollin D, Bunce RGH (2010) The effect of hedgerow loss on microclimate in the Mediterranean region: an investigation in Central Spain. *Agroforestry Systems* 78:13–25. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9224-z>
- Santana-Fernández J, Gómez-Gil J, Del-Pozo-San-Cirilo L (2010) Design and Implementation of a GPS Guidance System for Agricultural Tractors Using Augmented Reality Technology. *Sensors* 10:10435–10447. <https://doi.org/10.3390/s101110435>
- Schutter OD, Vanloqueren G (2011) The New Green Revolution: How Twenty-First-Century Science Can Feed the World. *The Solutions Journal* 2:33–44
- Scowcroft PG, Meinzer FC, Goldstein G, et al (2000) Moderating Night Radiative Cooling Reduces Frost Damage to *Metrosideros polymorpha* Seedlings Used for Forest Restoration in Hawaii. *Restoration Ecology* 8:161–169. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80023.x>
- Shtienberg D (2013) Will Decision-Support Systems Be Widely Used for the Management of Plant Diseases? *Annu Rev Phytopathol* 51:1–16. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102244>
- Simon HA (1962) the architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society* 106:467–482
- Siriri D, Wilson J, Coe R, et al (2013) Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. *Agroforestry*

- Systems 87:45–58. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9520-x>
- Skelsey P, Kessel GJT, Rossing WAH, van der Werf W (2009) Parameterization and Evaluation of a Spatiotemporal Model of the Potato Late Blight Pathosystem. *Phytopathology* 99:290–300. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-3-0290>
- Smits N, Dupraz C, Dufour L (2012) Unexpected lack of influence of tree rows on the dynamics of wheat aphids and their natural enemies in a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems* 85:153–164. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9473-5>
- Stamps WT, Linit MJ (1998) The problem of experimental design in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems* 44:187–196. <https://doi.org/10.1023/A:1006215130892>
- Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347:. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Talbot G (2011) L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales: une clef pour en comprendre la productivité? Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc
- Torralba M, Fagerholm N, Burgess PJ, et al (2016) Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230:150–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- Treder W, Mika A, Buler Z, Klamkowski K (2016) Effects of Hail Nets on Orchard Light Microclimate, Apple Tree Growth, Fruiting and Fruit Quality. *Acta Sci Pol-Hortorum Cultus* 15:17–27
- Tscharntke T, Tylianakis JM, Rand TA, et al (2012) Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. *Biological Reviews* 87:661–685. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00216.x>
- Turechek WW, Madden LV, Gent DH, Xu X-M (2011) Comments Regarding the Binary Power Law for Heterogeneity of Disease Incidence. *Phytopathology* 101:1396–1407. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-11-0100>
- van den Berg F, Bacaer N, Metz JAJ, et al (2011) Periodic host absence can select for higher or lower parasite transmission rates. *Evol Ecol* 25:121–137. <https://doi.org/10.1007/s10682-010-9387-0>
- van den Berg F, Gilligan CA, Bailey DJ, van den Bosch F (2010) Periodicity in Host Availability Does Not Account for Evolutionary Branching as Observed in Many Plant Pathogens: An Application to *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. *Phytopathology*® 100:1169–1175. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-09-0282>
- van Noordwijk M, Bayala J, Hairiah K, et al (2014) Agroforestry Solutions for Buffering Climate Variability and Adapting to Change. *Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems* 5:216–232
- Vanloqueren G, Baret PV (2008) Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural “lock-in” case study. *Ecological Economics* 6:436–446
- Vanloqueren G, Baret PV (2009) How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Research Policy* 38:971–983. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.02.008>
- Vezy R, Munz S, Gaudio N, et al (2020) Implementation of new formalisms in STICS for intercropping modeling. Montpellier, France
- Vinatier F, Gosme M, Valantin-Morison M (2013) Explaining host-parasitoid interactions at landscape scale: a new approach for calibration and sensitivity analysis of complex

- spatio-temporal models. *Landscape Ecology* 28:217–231. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9822-4>
- Vinatier F, Gosme M, Valantin-Morison M (2012) A tool for testing integrated pest management strategies on a tritrophic system involving pollen beetle, its parasitoid and oilseed rape at the landscape scale. *Landscape Ecology* 27:1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9795-3>
- Virto I, Imaz M, Fernández-Ugalde O, et al (2014) Soil Degradation and Soil Quality in Western Europe: Current Situation and Future Perspectives. *Sustainability* 7:313–365. <https://doi.org/10.3390/su7010313>
- Webber H, Zhao G, Wolf J, et al (2015) Climate change impacts on European crop yields: Do we need to consider nitrogen limitation? *European Journal of Agronomy* 71:123–134. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.002>
- Wezel A, Bellon S, Doré T, et al (2009) Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron Sustain Dev* 29:503–515. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Wezel A, Casagrande M, Celette F, et al (2014) Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron Sustain Dev* 34:1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>
- Wezel A, Goris M, Bruil J, et al (2018) Challenges and Action Points to Amplify Agroecology in Europe. *Sustainability* 10:1598. <https://doi.org/10.3390/su10051598>
- Wezel A, Soboksa G, McClelland S, et al (2015) The blurred boundaries of ecological, sustainable, and agroecological intensification: a review. *Agron Sustain Dev* 35:1283–1295. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0333-y>
- Widmer A (2001) Light intensity and fruit quality under hail protection nets. In: Palmer JW, Wunsche JN (eds) *Proceedings of the Seventh International Symposium on Orchard and Plantation Systems*. International Society Horticultural Science, Leuven 1, pp 421–426
- Wolf SA, Wood SD (2010) Precision Farming: Environmental Legitimation, Commodification of Information, and Industrial Coordination. *Rural Sociology* 62:180–206. <https://doi.org/10.1111/j.1549-0831.1997.tb00650.x>
- Wolfe MS, Baresel JP, Desclaux D, et al (2008) Developments in breeding cereals for organic agriculture. *Euphytica* 163:323–346. <https://doi.org/10.1007/s10681-008-9690-9>
- Wolz KJ, DeLucia EH (2018) Alley cropping: Global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 252:61–68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.005>
- Wu JG, David JL (2002) A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling* 153:7–26
- Young KJ (2017) Mimicking Nature: A Review of Successional Agroforestry Systems as an Analogue to Natural Regeneration of Secondary Forest Stands. In: Montagnini F (ed) *Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and Food Sovereignty*. Springer International Publishing, Cham, pp 179–209
- Zadoks J c. (1981) EIPRE: a Disease and Pest Management System for Winter Wheat Developed in the Netherlands. *EPPO Bulletin* 11:365–369. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1981.tb01945.x>
- Zampieri M, Ceglar A, Dentener F, Toreti A (2017) Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters* 12:064008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa723b>

- Zheng B, Chenu K, Chapman SC (2016) Velocity of temperature and flowering time in wheat - assisting breeders to keep pace with climate change. *Global Change Biology* 22:921–933. <https://doi.org/10.1111/gcb.13118>
- Zhu Y, Chen H, Fan J, et al (2000) Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* 406:718–722. <https://doi.org/10.1038/35021046>

X. Annexes

Annexe 1 : organigramme de l'unité ABSys



Tutelle: INRAE, CIRAD, Montpellier SupAgro, IAMM

Fonction: Chercheur, E-C, Technicien et appui

HDR: **obtenue; * en perspective pendant le quinquennat

Annexe 2 : Méthodes utilisées pour caractériser l'effet du contexte paysager sur les populations de bioagresseurs ou d'auxiliaires

label	étendue	taille parcelle	structure du parcelle: mean shape	quantité ou qualité des bordures	aggrégation, connectivité	composition dans buffer(s)	diversité des occupations dans buffer(s)	types d'occupations prises en compte	distances de séparation	corrélations, path analysis	régression, analyse de variance	classification	autre
(Weibull et al. 2000)	5 *5 Km					X	X	arable land, other crop land			X		ACP
(Östman et al. 2001)	5 *5 Km		X			X	X	arable land, other open land			X		
(Letourneau and Goldstein 2001)	1 Km	X	X			X		agriculture vs sauvage	X		X		PCA, DCA
(Östman 2002)	5 *5 Km		X			X	X	arable land, other crop land					power law
(Weibull et al. 2003)	5 *5 Km		X			X	X	arable land, other crop land			X		
(Weibull and Östman 2003)	5 *5 Km		X			X	X	arable land, other crop land					CCA
(Roschewitz et al. 2005a)	1000 m	X	X	X		X	X	% arable			X		
(Roschewitz et al. 2005b)	rayon 3000m	X				X		% arable			X		
(Putauf et al. 2005)	1500 m	X				X	X	% prairies			X		
(Clough et al. 2005)	500 m					X		% non-crop			X		
(Thies et al. 2005)	rayon 3000m					X		arable land, grassland, forest			X		
(Schmidt et al. 2005)	1500 m	X		X		X	X	% non-crop, arables, prairies, barman			X		RDA
(Laine and Hanski 2006)	50 x 70 km	X		X	X			forest, semi-open, field, water	X		X	X	K-functi on analy se
(Gabriel et al. 2006)	1000 m		X			X	X	arable land			X		Mantel test
(Rundlöf and Smith 2006)	1000 m	x				X		terres arables, prairies			X		
(Gibson et al. 2007)	paires de fermes	X	X	X		X	X	proportion de semi-nature dans			X		

label	étendue	taille parcelle	structure du parcelle: mean shape index	quantité ou qualité des bordures	aggrégation, connectivité	composition dans buffer(s)	diversité des occupations dans buffer(s)	types d'occupations prises en compte	distances de séparation	corrélations, path analysis	régression, analyse de variance	classification	autre
(Valantin-Morison et al. 2007)				X		X		culture hôte/n on hôte					
(Clough et al. 2007a)	rayon 1000m		X	X		X	X	arable land, grassl and, settle			X		test de Mantel
(Clough et al. 2007b)	rayon 1000 m					X		non- crop			X		
(Holzschuh et al. 2007)	rayon 1000m	X				X	X	pro port ion cult ures			X		
(Rundlöf et al. 2008b)	rayon 1000m	x				X		hétérogène (15% arable) et homogène (70%)			X		
(Rundlöf et al. 2008a)	rayon 1000m					X		"riche en bio" (31% à 87%) vs "pauvre en bio" (2 à 16%)			X		
(Boutin et al. 2008)	rayon 1000m			X	X	X		cropland, forest, old- fields (abandon ed fields)	X	X	X		DCA, Mantel test
(Macfadyen et al. 2009b)	paires de fermes										X		
(Eilers and Klein 2009)	rayon 1000m					X		semi- natura l/ (agric ultural)			X		
(Macfadyen et al. 2009a)	paires de fermes										X		Parti al Mantel tests
(Ricci et al. 2009)	70km²	x		X		X		ion al orc har ds	X		X		
(Boutin et al. 2009)	rayon 250m			X	X	X	X	forest, old fields, wetland, streams, built-up.		X	X		DCA, CCA, Mantel test
(Rundlöf et al. 2010)	1 km de rayon			X		X		bio/c ony			X		
(Hodgson et al. 2010)	10x10 Km					X		bio/conv /réserve naturell ●			X		
(Brittain et al. 2010)						X		agricole/ non cultivé (en fait, lardina			X		

label	étendue	taille parcelle	structure du parcelle: mean shape	quantité ou qualité des bordures	aggrégation, connectivité	composition dans buffer(s)	diversité des occupations dans buffer(s)	types d'occupations prises en compte	distances de séparation	corrélations, path analysis	régression, analyse de variance	classification	autre
(Gabriel et al. 2010)	10x10 Km					X		bio/conv , prairies, vergers, forêts.		X	X		PCA
(Diekötter et al. 2010)	rayon 1000m					X		0-4% de bio et 6-20% de bio			X		Bray - Curis statistique
(Holzschuh et al. 2010)	rayon 500m		X			X		crop /non crop					
(Aavik and Liira 2010)	30 km x 50 km		X	X		X	X	champs, prairies, villages, forêts, maréc			X	X	pCCA, DCA
(Ekroos et al. 2010)	rayon 1000m	X				X	X	cultivé/non cultivé villages, agricole, forêts.			X		
(Batary et al. 2010)				X		X		espec es semi-nature ls.			X		RDA
(Winqvist et al. 2011)	50km x 50 km	X				X	X	% arables : continuous urban fabrics, discontinuous			X		

- Aavik T, Liira J (2010) Quantifying the effect of organic farming, field boundary type and landscape structure on the vegetation of field boundaries. *Agriculture Ecosystems & Environment* 135:178–186
- Batary P, Matthiesen T, Tschamtk T (2010) Landscape-moderated importance of hedges in conserving farmland bird diversity of organic vs. conventional croplands and grasslands. *Biological Conservation* 143:2020–2027. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.05.005>
- Boutin C, Baril A, Martin PA (2008) Plant diversity in crop fields and woody hedgerows of organic and conventional farms in contrasting landscapes. *Agriculture Ecosystems & Environment* 123:185–193
- Boutin C, Martin PA, Baril A (2009) Arthropod diversity as affected by agricultural management (organic and conventional farming), plant species, and landscape context. *Ecoscience* 16:492–501
- Brittain C, Bommarco R, Vighi M, et al (2010) Organic farming in isolated landscapes does not benefit flower-visiting insects and pollination. *Biological Conservation* 143:1860–1867
- Clough Y, Holzschuh A, Gabriel D, et al (2007a) Alpha and beta diversity of arthropods and plants in organically and conventionally managed wheat fields. *Journal of Applied Ecology* 44:804–812
- Clough Y, Kruess A, Kleijn D, Tschamtk T (2005) Spider diversity in cereal fields: comparing factors at local, landscape and regional scales. *Journal of Biogeography* 32:2007–2014
- Clough Y, Kruess A, Tschamtk T (2007b) Organic versus conventional arable farming systems: Functional grouping helps understand staphylinid response. *Agriculture Ecosystems & Environment* 118:285–290
- Diekötter T, Wamser S, Wolters V, Birkhofer K (2010) Landscape and management effects on structure and function of soil arthropod communities in winter wheat. *Agriculture Ecosystems & Environment* 37:108–112
- Eilers EJ, Klein A-M (2009) Landscape context and management effects on an important insect pest and its natural enemies in almond. *Biological control* 51:388–394
- Ekroos J, Hyvonen T, Tiainen J, Tiira M (2010) Responses in plant and carabid communities to farming practises in boreal landscapes. *Agriculture Ecosystems & Environment* 135:288–293
- Gabriel D, Roschewitz I, Tschamtk T, Thies C (2006) Beta diversity at different spatial scales: Plant communities in organic and conventional agriculture. *Ecological Applications* 16:2011–2021
- Gabriel D, Sait SM, Hodgson JA, et al (2010) Scale matters: the impact of organic farming on biodiversity at different spatial scales. *Ecology Letters* 13:858–869
- Gibson RH, Pearce S, Morris RJ, et al (2007) Plant diversity and land use under organic and conventional agriculture: a whole-farm approach. *Journal of Applied Ecology* 44:792–803
- Hodgson JA, Kunin WE, Thomas CD, et al (2010) Comparing organic farming and land sparing: optimizing yield and butterfly populations at a landscape scale. *Ecology Letters* 13:1358–1367
- Holzschuh A, Steffan-Dewenter I, Kleijn D, Tschamtk T (2007) Diversity of flower-visiting bees in cereal fields: effects of farming system, landscape composition and regional context. *Journal of Applied Ecology* 44:41–49

- Holzschuh A, Steffan-Dewenter I, Tscharntke T (2010) How do landscape composition and configuration, organic farming and fallow strips affect the diversity of bees, wasps and their parasitoids? *Journal of Animal Ecology* 79:491–500
- Laine A-L, Hanski I (2006) Large-scale spatial dynamics of a specialist plant pathogen in a fragmented landscape. *Journal of Ecology* 94:217–226
- Letourneau DK, Goldstein B (2001) Pest damage and arthropod community structure in organic vs. conventional tomato production in California. *Journal of Applied Ecology* 38:557–570
- Macfadyen S, Gibson R, Polaszek A, et al (2009a) Do differences in food web structure between organic and conventional farms affect the ecosystem service of pest control? *Ecology Letters* 12:229–238
- Macfadyen S, Gibson R, Raso L, et al (2009b) Parasitoid control of aphids in organic and conventional farming systems. *Agriculture Ecosystems & Environment* 133:14–18
- Östman Ö (2002) Distribution of bird cherry-oat aphids (*Rhopalosiphum padi* (L.)) in relation to landscape and farming practices. *Agriculture Ecosystems & Environment* 93:67–71
- Östman Ö, Ekblom B, Bengtsson J (2001) Landscape heterogeneity and farming practice influence biological control. *Basic and Applied Ecology* 2:365–371
- Purtauf T, Roschewitz I, Dauber J, et al (2005) Landscape context of organic and conventional farms: Influences on carabid beetle diversity. *Agriculture Ecosystems & Environment* 108:165–174
- Ricci B, Franck P, Toubon J-F, et al (2009) The influence of landscape on insect pest dynamics: a case study in southeastern France. *Landscape Ecology* 24:337–349
- Roschewitz I, Gabriel D, Tscharntke T, Thies C (2005a) The effects of landscape complexity on arable weed species diversity in organic and conventional farming. *Journal of Applied Ecology* 42:873–882
- Roschewitz I, Hücker M, Tscharntke T, Thies C (2005b) The influence of landscape context and farming practices on parasitism of cereal aphids. *Agriculture Ecosystems & Environment* 108:218–227
- Rundlöf M, Bengtsson J, Smith HG (2008a) Local and landscape effects of organic farming on butterfly species richness and abundance. *Journal of Applied Ecology* 45:813–820
- Rundlöf M, Edlund M, Smith HG (2010) Organic farming at local and landscape scales benefits plant diversity. *Ecography* 33:514–522
- Rundlöf M, Nilsson H, Smith HG (2008b) Interacting effects of farming practice and landscape context on bumble bees. *Biological Conservation* 141:417–426
- Rundlöf M, Smith HG (2006) The effect of organic farming on butterfly diversity depends on landscape context. *Journal of Applied Ecology* 43:1121–1127
- Schmidt MH, Roschewitz I, Thies C, Tscharntke T (2005) Differential effects of landscape and management on diversity and density of ground-dwelling farmland spiders. *Journal of Applied Ecology* 42:281–287
- Thies C, Roschewitz I, Tscharntke T (2005) The landscape context of cereal aphid-parasitoid interactions. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B - Biological Sciences* 272:203–210
- Valantin-Morison M, Meynard JM, Doré T (2007) Effects of crop management and surrounding field environment on insect incidence in organic winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Crop Protection* 26:1108–1120
- Weibull A-C, Bengtsson J, Nohlgren E (2000) Diversity of butterflies in the agricultural landscape: the role of farming system and landscape heterogeneity. *Ecography* 23:743–750
- Weibull A-C, Östman Ö (2003) Species composition in agroecosystems: The effect of landscape, habitat, and farm management. *Basic and Applied Ecology* 4:349–361
- Weibull A-C, Östman Ö, Granqvist Å (2003) Species richness in agroecosystems: the effect of landscape, habitat and farm management. *Biodiversity and Conservation* 12:1335–1355
- Winqvist C, Bengtsson J, Aavik T, et al (2011) Mixed effects of organic farming and landscape complexity on farmland biodiversity and biological control potential across Europe. *Journal of Applied Ecology* 48:570–579

Annexe 3 : Tirés à part des principales publications